



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

**TECHNOLOGIE DRÁTOVÉHO ELEKTROJISKROVÉHO
OBRÁBĚNÍ**

TECHNOLOGY OF WIRE ELECTRICAL DISCHARGE MACHINING

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Adam Galko

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Karel Osička, Ph.D.

BRNO 2017

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Student: **Bc. Adam Galko**
Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Strojírenská technologie
Vedoucí práce: **Ing. Karel Osička, Ph.D.**
Akademický rok: 2016/17

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Technologie drátového elektrojiskrového obrábění

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Posouzení aplikace nekonvenční technologie elektrojiskrového drátového obrábění v podmínkách malé strojírenské firmy.

Cíle diplomové práce:

Rozbor nekonvenční technologie elektrojiskrového drátového obrábění.
Aplikace elektrojiskrového drátového obrábění v malé strojírenské firmě.
Technologie výroby typického představitele.
Rozbor provozních nákladů elektrojiskrového drátového obrábění.
Diskuze výsledků.

Seznam doporučené literatury:

MAŇKOVÁ, Ildikó. Progresívne technológie. 1. vydanie. Košice: Viena, 2000, 275 s. ISBN 80-709-430-4.

BARCAL, Jaroslav. Nekonenční metody obrábění. Skriptum FSI ČVUT. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1989.

KOCMAN, Karel a Jaroslav PROKOP. Technologie obrábění. 1. vydání. Brno: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 2001, 270 s. ISBN 80-214-1996-2.

FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA. Teorie obrábění, tváření a nástroje. 1. vydání. Brno: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 2006, 225 s. ISBN 80-214-2374-9.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Táto práca sa zaoberá praktickým využitím technológie elektroerozívneho obrábania drôtovou elektródou (WEDM), ktoré patrí do skupiny metód elektroerozívneho obrábania. Vo svojej práci som sa zamerlal na výrobu strižnice postupového nástroja vyrábaného v spoločnosti FOR MIX s.r.o. Trenčín. Strižnicu je možné považovať za typického výrobného predstaviteľa z výrobného programu uvedenej spoločnosti. V praktickej časti diplomovej práce podrobnejšie rozoberám technologické a nákladové aspekty elektroiskrového drôtového obrábania v konkrétnych podmienkach spoločnosti FOR MIX s.r.o..

Kľúčové slová

EDM, WEDM, elektroiskrové obrábanie drôtovou elektródou, nekonvenčné technológie.

ABSTRACT

This thesis talk about practical application of wire electrical discharge machining (WEDM), which belongs to electro-erosion machining methods. This thesis is focused on the production of cutting dies produced by company FOR MIX s.r.o. Trenčín. We can consider the cutting die as a typical product of company's product program. In the practical part of this diploma thesis, there is detail of technological aspects and operating costs for wire electrical discharge machining technology in specific condition of company FOR MIX s.r.o.

Key words

EDM, WEDM, wire electrical discharge machining, Un-conventional technology.

BIBLIOGRAFICKÁ CITÁCIA

GALKO, Adam. Technologie drátového elektroiskrového obrábění. Brno 2017. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. 70 s. 4 přílohy. Vedúci práce Ing. Karel Osička, Ph.D.

PREHLÁSENIE

Prehlasujem, že som diplomovú prácu na tému **Technologie drátového elektrojiskrového obrábění** vypracoval samostatne s použitím odbornej literatúry a prameňov, uvedených v zozname, ktorý tvorí prílohu tejto práce.

23.5.2017

Dátum

Bc. Adam Galko

POĎAKOVANIE

Touto cestou by som sa chcel poďakovať vedúcemu práce Ing. Karlu Osičkovi, Ph.D. za jeho cenné rady a pripomienky pri vypracovaní diplomovej práce.

Taktiež ďakujem vedeniu spoločnosti FOR MIX s.r.o. za možnosť vypracovať praktickú časť diplomovej práce v podmienkach podniku a zamestnancom za ich pomoc, ochotu a rady pri jej zhotovení.

OBSAH

ABSTRAKT	3
PREHLÁSENIE.....	4
POĎAKOVANIE	5
OBSAH.....	6
ÚVOD.....	8
1 ZÁKLADY ELEKTROERÓZIE	9
1.1. História.....	9
1.2. Fyzikálny princíp elektroerózie	9
1.3. Popis jednotlivých fáz pri vzniku výboja	10
1.4. Princíp elektroerozívneho obrábania	12
1.5. Popis impulzov	14
1.6. Základné matematické vzťahy pre hodnotenie impulzov	16
1.7. Hodnotenie produktivity obrábania elektroerozívnymi metódami	19
2 ROZBOR NEKONVEČNEJ TECHNOLOGIE ELEKTROISKROVÉHO DRÔTOVÉHO REZANIA	20
2.1. Úvod do WEDM.....	20
2.2. Princíp WEDM	20
2.3. Nástroje pre obrábanie WEDM	21
2.3.1. Vlastnosti drôtovej elektródy	21
2.3.2. Rozdelenie drôtov.....	23
2.3.3. Spôsob navliekania drôtu	26
2.4. Charakter povrchu po rezaní drôtovou elektródou	27
2.5. Rozmerová presnosť po rezaní drôtovou elektródou.....	28
2.6. Generátory pre drôtové rezačky.....	29
2.6.1. Druhy a popis jednotlivých generátorov	29
2.7. Dielektrická kvapalina	31
2.7.1. Dielektrický systém	32
2.8. Produktivita procesu rezania technológiou WEDM	33
2.9. Výhody WEDM.....	35
2.10. Nevýhody WEDM:	36
2.11. Použitie WEDM.....	36
3 APLIKÁCIA ELEKTROISKROVÉHO DRÔTOVÉHO OBRÁBANIA V MALEJ STROJÁRENSKEJ FIRME.....	37
3.1. Predstavenie spoločnosti FOR MIX s.r.o. Trenčín.....	37
3.2. Stroje používané na obrábanie technológiou WEDM	37

3.2.1.	Popis elektroiskrovej drôtovej rezačky Fanuc.....	38
3.3.	Voľba drôtu pre technológiu WEDM.....	41
3.4.	Tvorba NC programu.....	41
3.4.1.	Popis programu WIRECUT	42
3.5.	Voľba počtu rezov	42
3.5.1.	Hrubovací rez	42
3.5.2.	Dokončovací rez.....	43
3.5.3.	Korekcia	43
4	TECHNOLÓGIA VÝROBY TYPICKÉHO PREDSTAVITEĽA	44
4.1.	Voľba typického predstaviťa	44
4.2.	Postup výroby strižnice.....	46
4.3.	Materiál strižnice	47
4.4.	Rezací drôt	48
4.5.	Programovanie procesu rezania	48
4.5.1.	Tvorba NC programu typického predstaviťa.....	48
4.6.	Upnutie obrobku	50
4.7.	Ustavenie obrobku	51
4.8.	Upravenie vygenerovaného NC programu	51
5	TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOTENIE.....	54
5.1.	Obstarávacie náklady N_o	54
5.1.1.	Výpočet ročného časového fondu stroja T_{FR}	55
5.2.	Náklady na spotrebný materiál N_s	55
5.3.	Náklady na drôt N_d	56
5.4.	Personálne náklady N_m	56
5.5.	Náklady na energie N_e	57
5.6.	Náklady na údržbu	57
5.7.	Podiel výrobnnej a správnej réžie	58
5.8.	Hodinová sadzba stroja N_c	58
5.9.	Grafické zobrazenie rozboru nákladov	59
	DISKUSIA.....	60
	ZÁVER	61
	ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV	62
	ZOZNAM POUŽITÝCH SYMBOLOV	65
	ZOZNAM POUŽITÝCH SKRATIEK.....	68
	ZOZNAM PRÍLOH.....	70

ÚVOD

Elektroerozívne obrábanie patrí do elektrických metód obrábania, pretože dochádza k priamemu využitiu elektrickej energie bez toho, aby bola táto energia premenená na mechanickú energiu.

Veľkou výhodou metód elektroerozívneho obrábania je, že jedinou podmienkou ich využiteľnosti je elektrická vodivosť obrobku, čiže nie je závislá od mechanických vlastností obrábaného materiálu. V posledných rokoch prešli stroje určené na elektroiskrové obrábanie veľkým vývojom, čo zvýšilo ich produktivitu. V dnešnej dobe je táto technológia súčasťou výrobného postupu takmer každého výrobcu lisovacích nástrojov.

Metódy elektroerozívneho obrábania sú využívané predovšetkým pri výrobe tvárniacich nástrojov a foriem. Je to spôsobené tým, že je potrebné veľmi presne opracovať zložité tvary z materiálov, ktoré sa vyznačujú vysokou tvrdosťou a pevnosťou.

Táto práca sa zaoberá výrobou strižnice z kalenej nástrojovej ocele pre združený postupový nástroj na lisovanie plechov. Praktickú časť som realizoval v spoločnosti FOR MIX s.r.o. Trenčín, ktorá mi poskytla spoluprácu a odborné rady.

Cieľom tejto práce je poukázať na nevyhnutnosť operácie elektroerozívneho drôtového rezania pri výrobe tvárniaceho nástroja, analyzovať proces rezania z technického i nákladového hľadiska, prípadne poukázať na možnosti zlepšenia aktuálneho stavu.

1 ZÁKLADY ELEKTROERÓZIE

Základom elektroerozívneho obrábania je elektroerozívny jav, ktorého princíp a jednotlivé fázy sú popísané v ďalších kapitolách. Tento jav je využívaný nekonvenčnými technológiami, ako je elektroerozívne brúsenie, hĺbenie, rezanie, mikrodierovanie.

1.1. História

História elektroerozívneho obrábania siaha už do roku 1768, keď sa anglický fyzik Sir Josef Priestley zaoberal štúdiom „negatívneho“ vplyvu elektrickej energie na kovové kontakty spínačov, ktoré sa pri dlhodobom používaní opotrebojú. Opotrebovanie vzniká v dôsledku elektrických výbojov zapríčinených oddaľovaním kontaktov. Tento jav bol prakticky využitý v polovici 20. storočia sovietskymi inžiniermi, manželmi Lazarenkovovými. Tí zistili, že pri opakovanom spínaní a rozpínaní kontaktov dochádza k odstraňovaniu materiálu na jednej z elektród a tvar odobraného materiálu je presnou kópiou druhej elektródy. Postupne upravovali model použitím dielektrika pre eliminovanie vplyvov okolitého prostredia, až došlo k vytvoreniu prvého elektroiskrového stroja, okolo roku 1950. Vývoj týchto strojov prebiehal dvoma smermi [2]:

- zdokonaľovaním mechanickej časti stroja,
- vývojom generátorov elektrických impulzov.

V dnešnej dobe je možné pomocou elektroerózie obrábať najrôznejšie tvary, ako je zobrazené na obr. 1 [4].

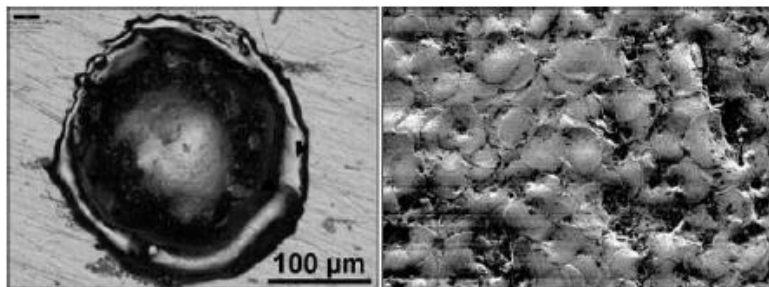


Obr. 1 Produkty elektroerózie [28].

1.2. Fyzikálny princíp elektroerózie

Základom elektrickej erózie je vznik výbojov pôsobiacich v miestach na povrchu dvoch elektród. Výboj je nositeľom elektrického prúdu. Nosným prvkom prúdu sú elektricky nabité častice, vzniknuté pri ionizácii kvapaliny a oddeľovaním z oboch elektród. Z kryštalickej mriežky katódy sú uvoľňované elektróny a z anódy sú uvoľňované ióny. Tieto mikročastice sú urýchľované elektrickým poľom, a tým získavajú pohybovú energiu, ktorú pri náraze na elektródu odovzdajú. Tým dochádza k premene elektrickej energie na tepelnú.

V dôsledku tepelnej energie sa materiál prudko ohrieva, až dochádza k nataveniu povrchu a k odpareniu materiálu vo forme dutých guľôčok. Vplyvom tlaku kovových pár sú guľôčky z miesta vymrštené a vzniká kráter. Vznik kráterov je typickým znakom elektroerozie. Krátery sa postupným opakovaním výboja prekrývajú, až vzniká obrobený povrch. Takto vzniknutý povrch obrobeného materiálu je možné vidieť na obr. 2 [1].



Obr. 2 Kráter po jednotlivom výboji (vľavo), obrobený povrch po sérii výbojov [6].

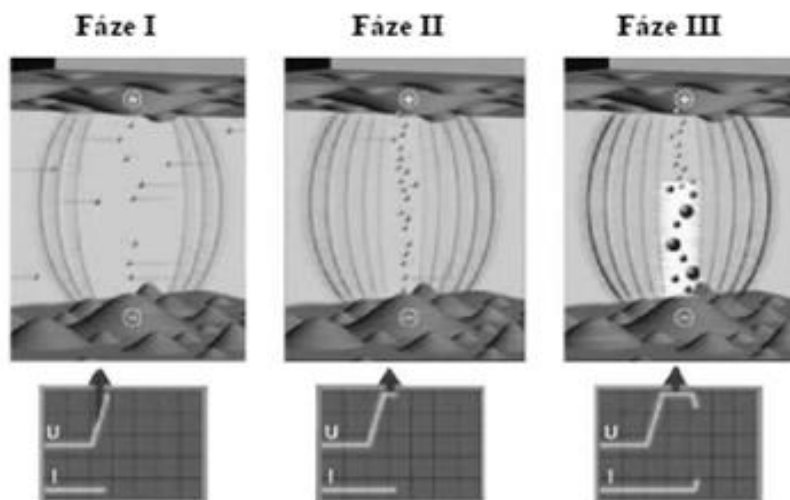
Elektroerozívne obrábanie môže prebiehať v plynnom alebo kvapalnom prostredí. Vzhľadom na vyššiu produktivitu a lepšie vlastnosti rezaného povrchu sa používa predovšetkým elektroerozívne obrábanie v kvapalnom prostredí – dielektrickej kvapaline. Dielektrická kvapalina je kvapalina s vysokým elektrickým odporom [4].

Elektrický výboj vzniká medzi dvoma elektródami po privedení napätia. Veľkosť napätia závisí od [8]:

- medzielektrodovej vzdialenosti,
- vodivosti dielektrika,
- znečistení dielektrika.

1.3. Popis jednotlivých fáz pri vzniku výboja

Proces vzniku jedného výboja je možné rozdeliť do deviatich fáz. Jednotlivé fázy s priebehom charakteristických veličín generátora (napätia U a prúdu I) môžeme sledovať na obr. 3, obr. 4, a obr. 5:



Obr. 3 Fáza I, II, III vzniku výboja [14].

I. Fáza – vznik gradientu.

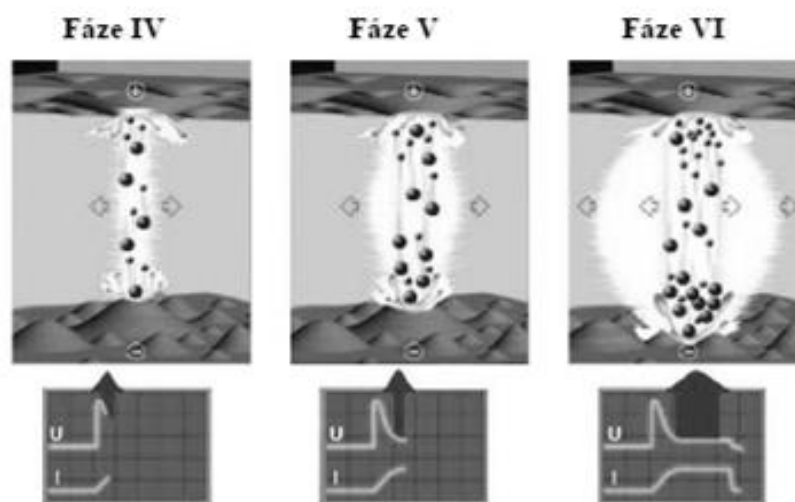
Vplyvom zosilnenia elektrického poľa, dochádza medzi elektródami k polarizácii molekúl a iónov. Medzi bodmi elektród, ktoré majú najmenšiu vzdialenosť, vzniká miesto maximálneho gradientu a elektricky vodivé častice sú do tohto miesta vťahované [1].

II. Fáza – vznik mostíka.

Po dosiahnutí maximálnej hodnoty napätia vytvárajú elektricky vodivé častice, v mieste maximálneho gradientu mostík, potrebný k uskutočneniu výboja [13].

III. Fáza – ionizácia prostredia.

V tejto fáze dochádza k uvoľneniu elektrónov zo zápornej elektródy, ktoré kolidujú s neutrálne nabitými časticami a dochádza k roztriešteniu týchto častíc. Tým vytvárajú kladné a záporne ióny a dochádza k ionizácii prostredia [1].



Obr. 4 Fáza IV, V, VI vzniku výboja [14].

IV. Fáza – vytvorenie plazmy.

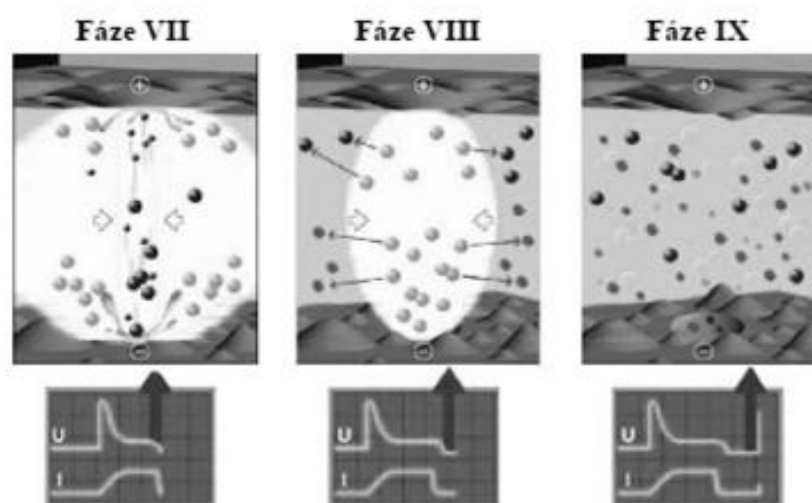
Roztrieštené ióny obaľujú stred výbojového kanála. Klesá jeho odpor a medzi elektródovým priestorom začne pretekať prúd. Vytvorí sa vodivý kanál tvorený plazmou a začne rásť teplota na povrchu elektród. Taktiež sa zvyšuje hodnota prúdu a napätie naopak klesá [14].

V. Fáza – vznik plynovej bubliny.

Vplyvom rastúcej teploty dochádza k odparovaniu dielektrika a vzniká plynová bublina. Dochádza k neusporiadanému narážaniu jednotlivých častíc, čo má za následok vzrast teploty a následné natavovanie a odparovanie povrchu elektród. Prúd rastie a napätie dosahuje zápalnú hodnotu [13].

VI. Fáza – expanzia plynovej bubliny.

Tu dochádza k expanzii plynovej bubliny, k ďalšiemu natavovaniu a odparovaniu povrchu elektród [14].



Obr. 5 Fáza VII, VIII, IX vzniku výboja [14].

VII. Fáza – vznik krátera.

Po prerušení prívodu energie nastáva pokles prúdu a teploty a dochádza k vyrovnaniu tlakov bubliny smerom dovnútra tzv. implózia plynovej bubliny. V priestore medzi elektródami poklesne tlak plynu (kavitácia), čo v praxi znamená, že natavené častice povrchu sú vytrhávané do priestoru medzi elektródami a vzniká kráter [13].

VIII. Fáza – zánik bubliny.

Po poklese prúdu a napätia na nulovú hodnotu, bublina zaniká a do priestoru sa dostáva dielektrikum, účinkom ktorého sa ochladzuje miesto rezu, a tým sa zastaví prestup tepla ďalej do hĺbky obrábaného materiálu. Spaliny po erózii zostávajú naďalej v priestore medzi elektródami v tvare mikročastíc a guľôčok [1].

IX. Fáza Dielektrikum je znečistené spalinami po predchádzajúcom výboji. V medzelektrodovom priestore sú častice, ktoré tvoria základ pre tvorbu nového výbojového kanálu [14].

1.4. Princíp elektroerozívneho obrábania

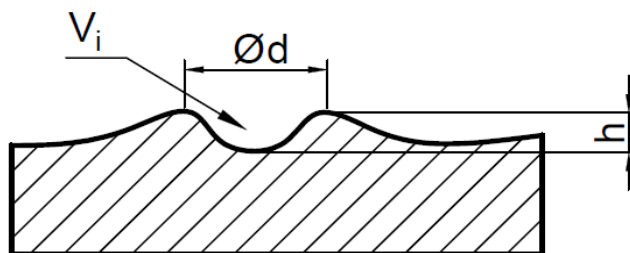
Elektroerozívne obrábanie je technologický proces úberu materiálu, ktorý využíva elektroerozívny jav. Obrábanie prebieha pod hladinou dielektrika, medzi dvomi vodivými elektródami, za pomoci pôsobenia rýchlych periodicky sa opakujúcich impulzov tvorených generátorom, ktoré sú štatisticky rozmiestnené po celej ploche nástroja. Najčastejšie zapojenie je nástroj ako katóda (-) a obrobok ako anóda (+).

Medzi jednotlivými elektródami je iskrová medzera, inak by došlo ku skratu. Veľkosť iskrovej medzery sa pohybuje v rozmedzí od 0,01-0,4 mm. Najčastejšie však hodnota medzery dosahuje veľkosť 0,02 mm.

Na elektródy je privedené napätie z generátora. V dôsledku pôsobenia elektrického napätia dochádza k predvýbojovej fáze, zakončenej prierazom dielektrika, spravidla v mieste najsilnejšieho napäťového poľa. Vplyvom tohto poľa, sa uvoľňujú voľné záporné a kladné ióny, ktoré sú týmto poľom urýchľované. To vedie k vytvoreniu ionizovaného kanála, cez ktorý môže medzi elektródami pretekať prúd. Tu vznikajú výboje, čo má za následok zrážky častíc, čím dochádza k nataveniu povrchu a následnému odparovaniu kovu z obrobku [2, 4].

Odtavený kov pôsobením chladiaceho účinku dielektrika tuhne a v tvare guľôčok je dielektrikom odplavený do zbernej nádoby. Vzniknutý kráter je typický pre tento typ obrábania. Je definovaný priemerom a hĺbkou (viď obr. 6). Objem tohto kráteru sa pohybuje od 10^{-5} až 10^{-3} mm³. Celkový úber materiálu sa však vypočíta ako súčet objemu odstráneného materiálu na anóde a katóde. Pre čo najproduktívnejšie obrábanie je nutné dosiahnuť maximálnu stratu materiálu na obrobku a minimálnu stratu materiálu na nástroji. Tento fakt ovplyvňujú mnohé parametre napr. [2, 13, 17]:

- voľba vhodnej kombinácie materiálov nástroj/obrobok,
- voľba vhodného dielektrika,
- parametre generátora,
- polarita zapojenia nástroj/obrobok.



Obr. 6 Prierez kráteru po elektrickom výboji [2].

Typickými technológiami využívajúcimi jav elektroerozie je elektroerozívne hĺbenie (EDM), elektroerozívne rezanie drôtovou elektródou (WEDM) a elektroerozívne brúsenie (EDG). Každá z uvedených metód má špecifické využitie v priemysle, využíva špecifické zariadenia a podmienky obrábania.

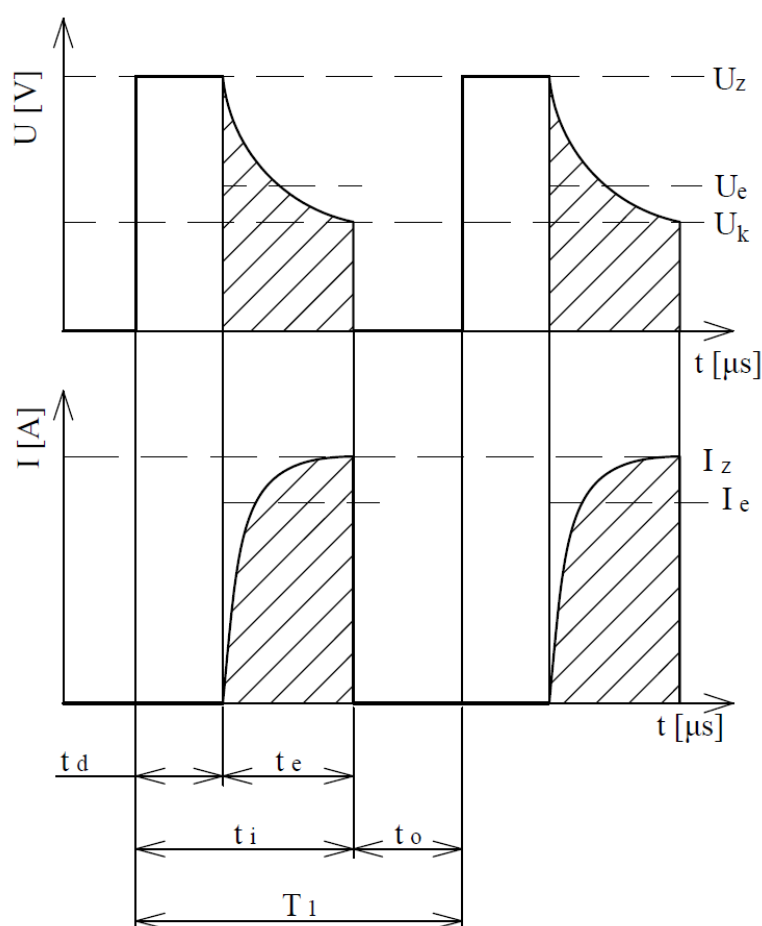
Pri elektroerozívnom hĺbení (EDM) sa elektróda, ktorá je vyrobená konvenčnými metódami obrábania posúva smerom k obrobku tak, aby sa udržala nastavená hodnota medzery. Tým dochádza k vyrodovaniu povrchu obrobku, a tak vzniká presná kópia tvaru elektródy. Elektroerozívne hĺbenie sa využíva najmä pri výrobe zložitých tvarov dutín a tvárniacich nástrojov [2].

Pri elektroerozívnom brúsení (EDG) je nástrojová elektróda tvorená kotúčom, ktorý vykonáva rotačný pohyb. Tak ako pri iných metódach elektroerozívneho obrábania nedochádza k priamemu kontaktu oboch elektród (nástroja a obrobku). Medzi nástrojom a obrobkom je medzera, ktorá sa pohybuje v rozmedzí hodnôt od 0,08 mm do 0,013 mm. Táto metóda je využívaná pri brúsení vysokopevných ocelí, pri brúsení tenkých a krehkých materiálov [1].

Pri elektroerozívnom rezaní drôtovou elektródou (WEDM) je nástrojová elektróda tvorená drôtom priemeru od 0,02 mm až do 0,3 mm navinutým na cievke. Drôt je postupne odvíjaný špeciálnym zariadením stroja a prechádza vopred vytvoreným otvorom. Drôt je následne odvíjaný ďalšou cievkou a ukladaný do zbernej nádoby. Prevíjaním sa eliminuje opotrebenie nástrojovej elektródy. Obrábanie je uskutočňované sériou výbojov a ich účinkom na obrobok. Touto metódou sú vyrábané tvarovo zložité súčiastky typu strižník alebo strižnica. Výsledné tvary dosahujú rozmerovú presnosť na úrovni tisícín milimetra a vykazujú veľmi nízku drsnosť povrchu bežne Ra 0,8.

1.5. Popis impulzov

Na obr. 7 je zobrazený časový priebeh impulzu vytvoreného generátorom. Časový priebeh impulzu výrazne ovplyvňuje profil vytvoreného kráteru, ktorý má zásadný vplyv na výslednú povrchovú drsnosť a presnosť rozmerov [8, 13].



Obr. 7 Časová závislosť priebehu napätia U a prúdu I [8].

- t_i – doba impulzu – (čas ON) čas medzi zapojením a odpojením generátora. Určuje opotrebenie elektródy. Väčšia doba trvania impulzu znamená väčšie množstvo odoberaného materiálu, a tým sa zvyšuje dosahovaná drsnosť. Kratšia doba impulzu znamená menšiu pracovnú medzeru, menšie množstvo odobraného materiálu a lepšiu drsnosť povrchu.

- t_o – doba pauzy – (čas OFF) je doba potrebná na obnovenie izolačnej schopnosti dielektrika po výboji pre opakované stabilné obrábanie. V tejto dobe dochádza k výplachu iskriska. Kratšia doba pauzy nie je vhodná pri vysokých prúdoch, pretože dochádza k väčšiemu vymršťovaniu materiálu do medzielektródového priestoru a nenastane dôkladný výplach iskriska, čo má za následok vznik oblúku.
- t_d – doba oneskorenia výboja – je čas medzi zapojením generátora a okamihom prerazu dielektrika, pretože výboj nenastane hneď. Udeje sa tak až po určitom časovom úseku, počas ktorého vznikajú počiatočné elektróny – štatistické oneskorenie.
- t_e – doba výboja - úsek medzi okamihom prerazu a odpojením generátora, jedná sa o dĺžku trvania výboja.
- T_1 – perióda – parameter obrábania dôležitý pre bilancovanie obrábania. Prevrátená hodnota periódy nám udáva frekvenciu výbojov. Spolu s energiou pulzu určujú počet vytvorených kráterov na danej ploche. Perióda je daná vzťahom 1 [8]:

$$T_1 = t_i + t_o \quad [\mu s] \quad (1)$$

Kde:

- T_1 $[\mu s]$ - čas periódy
- t_i $[\mu s]$ - doba impulzu
- t_o $[\mu s]$ - doba pauzy
- I_z – prúd výboja – veľkosť prúdu pri prieraze dielektrika. Pri nastavení väčšej hodnoty prúdu je do oblasti medzi elektródami privádzaná väčšia energia, čo má za následok zväčšenie množstva odoberaného materiálu. Dosahujeme väčšiu drsnosť s menším opotrebením elektródy.
- I_e – stredný prúd – hodnota prúdu medzi zapálením a vyhasnutím výboja
- U_z – zápalné napätie – napätie pri zapojení generátora. Čím je vyššia hodnota zápalného napätia, tým väčšie je množstvo odobraného materiálu.
- U_e – stredné napätie – hodnota napätia medzi zapálením a vyhasnutím výboja
- U_k – napätie pri vyhasnutí výboja – napätie ovplyvnené procesnými parametrami ako druh dielektrika, materiál obrobku. Toto napätie nie je možné nastaviť [8, 17].

1.6. Základné matematické vzťahy pre hodnotenie impulzov

Pre numerické vyjadrenie množstva odobraného materiálu a ďalších hodnôt uvedených v tejto kapitole je potrebné poznať priebeh napätia a prúdu z generátora.

Profil krátera (viď obr. 6) závisí od veľkosti privedenej energie, dĺžky trvania výboja, materiálu elektród a od druhu použitého dielektrika. Profil krátera má veľký význam pri skúmaní povrchu obrábanej plochy. Ovplyvňuje parametre ako je drsnosť povrchu a presnosť rozmerov [4].

- **Objem krátera je daný vzťahom:**

$$V_i = \frac{\pi}{2} r^2 \cdot h = \frac{\pi}{8} \cdot d^2 \cdot h \quad (2)$$

Kde:

- V_i [mm³] objem krátera
- r [mm] polomer krátera
- d [mm] priemer krátera
- h [mm] hĺbka krátera

- **Závislosť medzi vybíjacou energiou a množstvom odobraného materiálu:** (vzťah je pre jeden výboj)

$$V_{ia} = k_a \cdot W_i \text{ [mm}^3\text{]}; \quad V_{ic} = k_c \cdot W_i \text{ [mm}^3\text{]} \quad (3)$$

Kde:

- V_{ia}, V_{ic} [mm³] množstvo odobraného materiálu
- k_a, k_c [-] súčiniteľ zahrňujúci vplyv materiálu platný pre katódu (c) a anódu (a)
- W_i [J] vybíjacia energia

- **Vybíjacia energia jedného impulzu W_i :**

$$W_i = \int_0^{\tau} U(t) \cdot I(t) \cdot dt \quad [J] \quad (4)$$

Kde:

- W_i [J] vybíjacia energia
- $U(t)$ [V] hodnota napätia impulzu
- $I(t)$ [A] hodnota prúdu impulzu
- τ [μs] čas trvania impulzu

- ***Stredná hodnota napätia a prúdu počas periódy:***

$$I_{st} = \frac{1}{T_1} \int_0^{T_1} I(t) \cdot dt \quad [A] \quad (5)$$

$$U_{st} = \frac{1}{T_1} \int_0^{T_1} U(t) \cdot dt \quad [V] \quad (6)$$

Kde:

- U(t) [V] hodnota napätia impulzu
- I(t) [A] hodnota prúdu impulzu
- T [s] perióda výboja
- U_{st} [V] stredná hodnota napätia počas celej doby periódy
- I_{st} [A] stredná hodnota prúdu počas celej doby periódy

- ***Efektívna hodnota prúdu a napätia počas periódy:***

$$I_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T_1} \int_0^{T_1} I^2(t) \cdot dt} \quad [A] \quad (7)$$

$$U_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T_1} \int_0^{T_1} U^2(t) \cdot dt} \quad [V]; \quad (8)$$

Kde:

- U(t) [V] hodnota napätia impulzu
- I(t) [A] hodnota prúdu impulzu
- T [s] perióda výboja
- U_{ef} [V] efektívna hodnota napätia počas celej doby periódy
- I_{ef} [A] efektívna hodnota prúdu počas celej doby periódy

- ***Stredná hodnota energie jedného impulzu:***

(po dosadení vzťahu 4 pre výpočet vybíjacej energie pulzu)

$$W_{st.im.} = \frac{W_i}{\tau} = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} U(t) \cdot I(t) \cdot dt \quad [J] \quad (9)$$

Kde:

- W_i [J] vybíjacia energia
- $U(t)$ [V] hodnota napätia impulzu
- $I(t)$ [A] hodnota prúdu impulzu
- τ [μ s] čas trvania impulzu
- $W_{st.im}$ [J] stredná hodnota energie jedného impulzu

- ***Stredná hodnota energie počas celej doby periódy:***

$$W_{st} = \frac{W_{st.im.}}{T_1} = W_{st.im.} \cdot f \quad [J] \quad (10)$$

Kde:

- W_{st} [J] stredná hodnota energie počas celej doby periódy
- $W_{st.im}$ [J] stredná hodnota energie jedného impulzu
- T [s] perióda výboja
- f [s^{-1}] frekvencia výboja

- ***Množstvo odobraného materiálu v závislosti na frekvencii je popísané rovnicou:***

$$Q_{a,c} = k_{a,c} \cdot \eta_d \cdot f \cdot \int_0^{\tau} U(t) \cdot I(t) \cdot dt \quad [mm^3 \cdot s^{-1}] \quad (11)$$

Kde:

- $Q_{a,c}$ [$mm^3 \cdot s^{-1}$] rýchlosť erózie, udávaná aj ako množstvo odobraného materiálu za jednotku času
- $k_{a,c}$ [-] súčiniteľ zahrňujúci vplyv materiálu platný pre katódu (c) a anódu (a)
- η_d [%] účinnosť elektrického náboja
- f [s^{-1}] frekvencia výboja
- $U(t)$ [V] hodnota napätia impulzu
- $I(t)$ [A] hodnota prúdu impulzu
- τ [μ s] čas trvania impulzu

1.7. Hodnotenie produktivity obrábania elektroerozívnymi metódami

Pri elektroerozívnom obrábaní je cieľom dosiahnuť čo najmenší úbytok materiálu na nástrojovej elektróde a maximálny úbytok materiálu na obrábanej elektróde. Pre porovnanie a pre hľadanie vhodnej kombinácie materiálov pre nástroj a obrobok, sa zaviedla pomerná veličina nazývaná *relatívne objemové opotrebenie nástrojovej elektródy* ϑ vyjadrené rovnicou 13 [4]:

$$\vartheta = \frac{V_n}{V_o} \cdot 100 \quad [\%] \quad (12)$$

Kde:

- ϑ [%] relatívne objemové opotrebenie nástrojovej elektródy
- V_n [mm³] objemové opotrebenie na nástrojovej elektróde
- V_o [mm³] objemové opotrebenie na obrábanej elektróde

Hodnota relatívneho opotrebenia je daná materiálom elektród, polaritou elektród, prúdom výboja a dobou trvania impulzu a pohybuje sa od desiatín až po niekoľko desiatok percent. Napríklad pri hrubom obrábaní medenou elektródou, kde obrobok je z ocelového materiálu, dosahuje hodnota relatívneho opotrebenia 0,5–3 %, pričom dokončovacie obrábanie dosahuje hodnôt od 2–10 %. Táto hodnota je dôležitá hlavne pre obrábanie technológiou elektroerozívného hĺbenia [4].

2 ROZBOR NEKONVEČNEJ TECHNOLOGIE ELEKTROISKROVÉHO DRÔTOVÉHO REZANIA

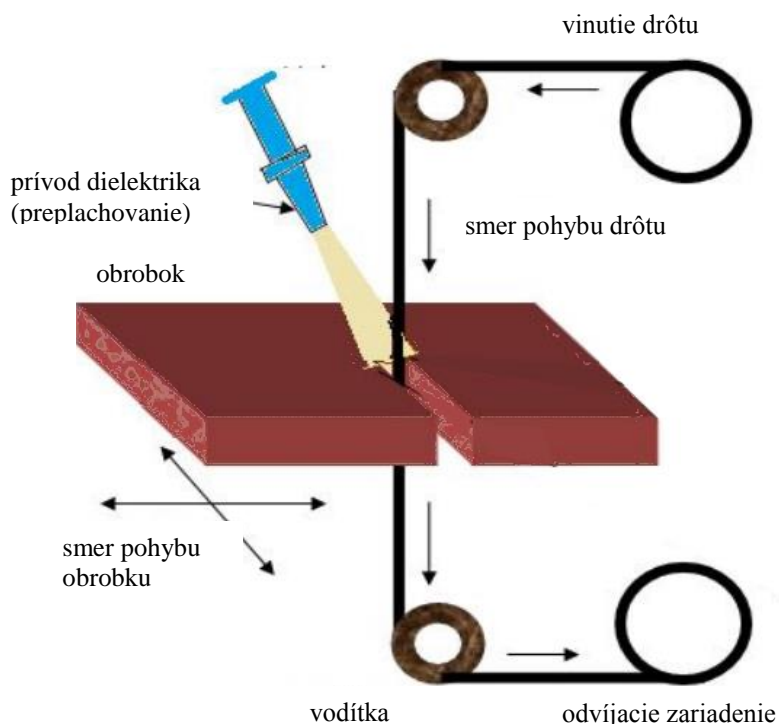
Je progresívnou metódou elektroerozívneho obrábania, ktorá má svoje nezastupiteľné miesto pri výrobe tvárniacich nástrojov. Je označované skratkou WEDM – Wire Electrical Discharge Machining.

2.1. Úvod do WEDM

Po zavedení technológie drôtového rezania do výroby, došlo k výraznému posunu vo výrobe tvárniacich nástrojov najmä nástrojov pre strihanie a lisovanie, pretože metóda sa vyznačuje minimálnou šírkou rezu. Táto technológia plne využíva proces elektroerózie, ktorý je popísaný v predchádzajúcich kapitolách [2, 12].

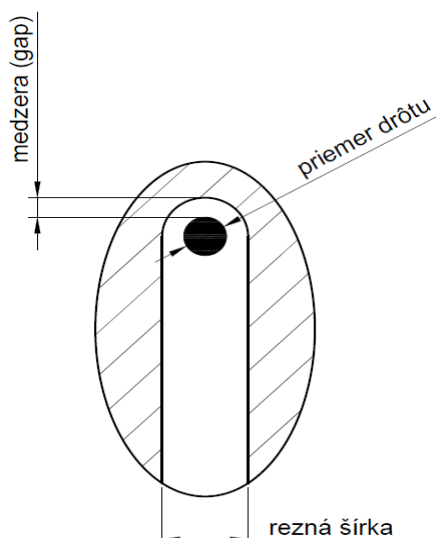
2.2. Princíp WEDM

WEDM je druh elektroerozívneho obrábania, kde nástrojovou elektródou je tenký drôt. Vodivé materiály sú obrábané sériou elektrických výbojov, ktoré sú produkované v generátore a cez pohybujúci sa drôt sú privádzané až k obrobku.



Obr. 8 Princíp elektroerozívneho obrábania drôtovou elektródou (WEDM) [15].

Priestor medzi drôtom a obrobkom, nazývaný medzera alebo iskrisko (viď obr. 9), je vyplnený dielektrikom [11].



Obr. 9 Schéma miesta rezu [2].

Nástroj je tvorený tenkým vodivým drôtom o priemere od 0,02 mm do 0,3 mm, ktorý je navinutý na cievke. Najčastejšie sa používa zapojenie nástrojovej elektródy (drôt) ako katódy (-) a obrobok ako anóda (+). Prechodom cez sústavu kladiek dochádza k vyrovnaní drôtu, ktorý je postupne odvíjaný pomocou odvíjacieho zariadenia a prechádza iskriskom. Rýchlosť odvíjania je riadená NC programom. Použitý drôt je následne uložený v zbernej nádobe a viac sa nepoužíva. Keďže drôt prechádza miestom rezu len raz, je vylúčený vplyv opotrebenia nástroja na presnosť obrobku [1, 2, 6].

Ako dielektrikum býva použitá deionizovaná voda alebo nízko viskózne kvapaliny, ktorých úlohou je vyplachovať erózne splodiny z miesta rezu a zabezpečovať dostatočné chladenie [4].

2.3. Nástroje pre obrábanie WEDM

Pri zavádzaní WEDM do praxe bolo potrebné nájsť vhodný materiál elektródy na základe jeho vlastností.

2.3.1. Vlastnosti drôtovej elektródy

- *Vodivosť*

Vodivosť udáva schopnosť materiálu prenášať elektrický prúd drôtom od generátora do iskriska.

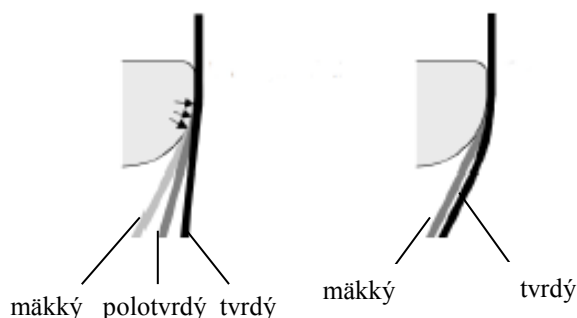
Vysoká vodivosť je dôležitá, pretože drôt môže prenášať väčšie množstvo prúdu. V praxi to znamená, že sa elektróda viac zahrieva, takže je možné použiť väčšiu rýchlosť rezania. Vodivosť sa uvádza v percentách. Vypočíta sa z pomeru vodivosti použitého materiálu drôtu k vodivosti čistého žíhaného medeného drôtu – k IACS (International Annealed Copper Standard) [6].

- *Pevnosť v ťahu*

Pri procese WEDM je drôt v každom momente napínaný na určité predpätie, aby nedochádzalo k nepresnostiam pri rezaní. V závislosti na veľkosti napätia v ťahu rozdeľujeme drôty na [7]:

- tvrdé (900 N.mm^{-2} a viac),
- polotvrde (okolo 490 N.mm^{-2}),
- mäkké (pod 440 N.mm^{-2}).

V praxi sa pre drôtovú elektródu najviac využívajú tvrdé, popřípadě polotvrde materiály. Hlavnou výhodou tvrdých drôtov je schopnosť vydržať vyššie ťahové namáhanie pre kolmý rez a pre rez do sklonu 5° . Taktiež je vhodnejší pre stroje s automatickým návlekom drôtu. Pre rezy so sklonom nad 5° sú používané mäkké drôty pretože sa jednoduchšie ohýbajú (ako je vidieť na obr. 10) a je možné dosiahnuť väčšiu presnosť rezania [22].



Obr. 10 Obrázok popisujúci závislosť dosiahnuteľného uhlu vyklonenia na tuhosti materiálu [22].

- *Teplota tavenia*

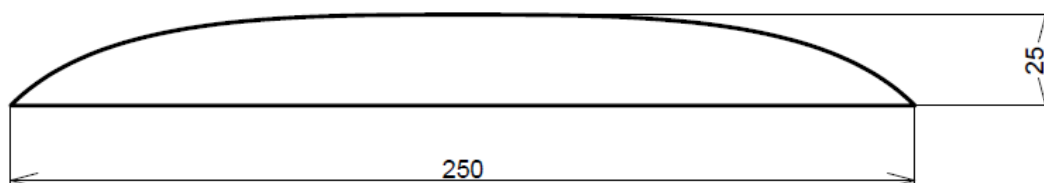
Drôt by mal mať čo najvyššiu teplotu tavenia, aby nedochádzalo počas obrábania k jeho natavovaniu. Drôty s nízkou teplotou tavenia výrazne zvyšujú opotrebenie drôtu, a preto dochádza k častému pretrhnutiu [6].

- *Ťažnosť drôtu*

Ťažnosť drôtu popisuje, ako je drôt plasticky deformovaný pred pretrhnutím. Drôty s vyššou ťažnosťou môžu prenášať väčšie sily. Tvrdé drôty majú ťažnosť značne nižšiu ako polotvrde [6, 7].

- *Priamosť drôtu*

Má vplyv na presnosť rezania. Je to veľmi dôležitý parameter pre automatické navliekanie drôtu. Drôty po rozvinutí z cievky na dĺžku 250 mm by nemali vykazovať zvlnenie väčšie ako 25 mm, ako je znázornené na obr. 10 [7, 11].



Obr. 11 Posúdenie priamosti drôtu [11].

- Čistota

Niekedy sa môže stať, že na drôte ostanú kovové zvyšky alebo mazivá po výrobe drôtu, čo môže mať za následok upchatie vedení. Zvyšovanie priemeru vplyvom usadených nečistôt na drôte, zvyšuje prívod energie do pracovnej medzery, čo vedie k zvýšeniu miery odstraňovania materiálu [6].

2.3.2. Rozdelenie drôtov

- nepovlakované,
- povlakované,
- difúzne povlakované,
- kompozitné drôty,
- špeciálne drôty.

Nepovlakované drôty

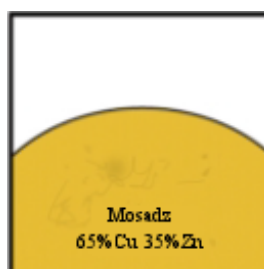
Nepovlakované drôty sú vyrobené z jedného homogénneho materiálu a nemajú žiadny povlak ani kompozitnú štruktúru. V praxi sú najviac využívané drôty na báze medi a mosadze [6].

Medený drôt

Používa sa od začiatku zavedenia WEDM technológie do praxe. Vďaka svojej vysokej elektrickej vodivosti je ideálny pre túto technológiu. Na druhej strane má medený drôt nízku pevnosť v ťahu, čo nie je vhodná vlastnosť pre niektoré generátory, a preto bol nahradený mosadzným drôtom. Využíva sa v aplikáciách, pri ktorých je neprijateľná prítomnosť zinku [7, 22].

Mosadzný drôt

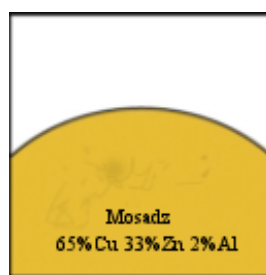
Rez mosadzným drôtom je zobrazený na obr. 12. Je to najčastejšie používaný drôt v praxi. Mosadz je zliatina medi a zinku. Táto zliatina sa vyznačuje vyššou pevnosťou v ťahu, primeranou vodivosťou a nižšou cenou v porovnaní s medennými drôtmi. Má dobrú priamosť, jednoducho sa strihá, preto je vhodnou voľbou pre stroje s automatickým návlekom drôtu. Najčastejšie zloženie je 65 % Cu a 35 % Zn. Mosadzný drôt má 5 krát menšiu vodivosť ako meď. Nevýhodou je tiež skutočnosť, že po obrobení vznikne vrstva mosadze na obrobníku a na jej odstránenie je potrebné použiť ďalšiu technológiu ako napríklad brúsenie [6, 22].



Obr. 12 Mosadzný drôt [7].

Mosadzné drôty s prímiesou hliníka

Pridaním malého množstva hliníka do mosadze vzniká špecifická zliatina. Hliník v tejto zliatine zlepšuje ťahové vlastnosti drôtu (pevnosť v ťahu až 1 200 MPa) bez ovplyvnenia ťažnosti. Tieto drôty sú menej náchylné na pretrhnutie. Schematický prierez drôtom je vidieť na obr. 13 [6, 7].



Obr. 13 Mosadzný drôt s prímiesou Al [7].

Molybdénové drôty

Molybdénové drôty sa používajú v špecifických prípadoch, kedy sa vyžaduje veľmi vysoká pevnosť v ťahu pri použití malého priemeru drôtu. Ďalšou výhodou je vysoká teplota tavenia, čo zaručuje, že drôt sa počas procesu obrábania vplyvom teploty neroztrhne. Na druhej strane má nízku elektrickú vodivosť a je veľmi abrazívny, čo sa prejaví na opotrebení vodítok a na komplikovanom automatickom navliekaní. Nevýhodou je vyššia cena oproti mosadzným drôtom [6, 7].

Volfrámový drôt

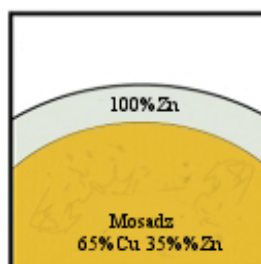
Volfrámový drôt má ešte väčšiu pevnosť v ťahu a teplotu topenia ako molybdénový drôt. Je často označovaný ako „úsporná“ alternatíva molybdénových drôtov pri malých priemeroch [6].

Povlakované drôty

V snahe dosiahnuť na povrchu drôtu vyšší obsah Zn a to bez ovplyvnenia jadra, boli vyvinuté povlakované drôty. Ako povlak sa používajú materiály, ktoré zvyšujú výbojové charakteristiky. Jadro najčastejšie tvorí meď, mosadz a ako materiál pre povlak sa používa napríklad oxid zinočnatý (ZnO). Tento typ drôtov umožňuje zvýšenie rýchlosti rezania o 5 % až 20 %. Nevýhodou však býva častá odchýlka od menovitého priemeru drôtu, a tým časté upchávanie vodítok. Taktiež majú tendenciu sa krútiť a nie sú vhodné pre automatický návlak. Najväčšou nevýhodou je vysoká cena v porovnaní s ostatnými drôtmi [7, 22].

Pozinkovaný mosadzný drôt

Tento drôt sa skladá z mosadzného jadra a zo zinkovej tenkej vrstvy približne 5 μm (viď obr. 14). Bol to jeden z prvých pokusov využiť vhodné rezné vlastnosti zinku. Vďaka tejto vrstve dochádza k významnému zvýšeniu reznej rýchlosti porovnaní s mosadznými drôtmi, bez poklesu iných kritických vlastností. Využívajú sa na rezanie karbidov volfrámu, polykrystalického diamantu a grafitu. Nedochádza k vzniku mosadznej vrstvy, ako je tomu pri rezaní pomocou mosadzných drôtov.



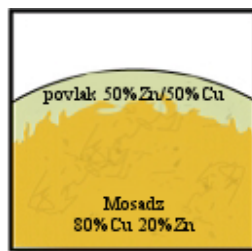
Obr. 14 Pozinkovaný mosadzný drôt [7].

Pozinkované medené drôty

Kombinujú vodivosť medeného jadra a výborných výbojových vlastností zinku. Pri rezaní však nevykazuje také dobré vlastnosti ako pozinkovaný mosadzný drôt.

Difúzne povlakované drôtové elektródy

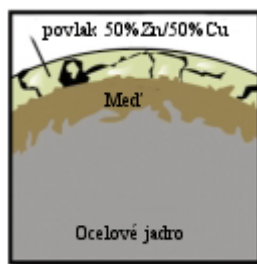
Využívajú proces difúzneho žihania pre zvýšenie koncentrácie zinku v povrchovej vrstve (viď obr. 15). Pri difúzii dochádza k premiestňovaniu atómov z miest s vyššou koncentráciou, do miest s nižšou koncentráciou. To znamená, že atómy zinku difundujú do mosadze a atómy medi difundujú do zinku. Tak vzniká drôtová elektróda s vysokým bodom tavenia, výbornými výbojovými vlastnosťami a vysokou produktivitou obrábania. Na rozdiel od jednoduchého povlaku s obsahom Zn, nedochádza k odtavovaniu jednotlivých častíc Zn počas obrábania.



Obr. 15 Difúzne povlakovaný mosadzný drôt [7].

Kompozitné drôty

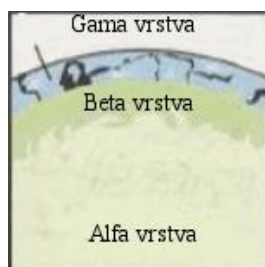
Kombinujú použitie bežných a netradičných materiálov pre výrobu drôtových elektród. Napríklad ide o spojenie medeného povlaku s oceľovým jadrom (viď obr. 16). Výsledný kompozit má zvýšenú pevnosť v ťahu a vodivosť, ale jeho nevýhodou je vysoká obstarávacía cena.



Obr. 16 Kompozitný drôt s oceľovým jadrom [7].

Špeciálne drôty

Majú v povrchovej vrstve 60–70 % zinku a vyznačujú sa vysokou krehkosťou. (viď obr. 17). Základom je difúzne povlakovaný drôt, na ktorý je znova nadifundovaná ďalšia vrstva tzv. gama vrstva. Ich použitím je možné dosiahnuť až o 50 % vyšší výkon ako pri mosadznom drôte [23].



Obr. 17 Gama povlakovaný drôt [23].

2.3.3. Spôsob navliekania drôtu

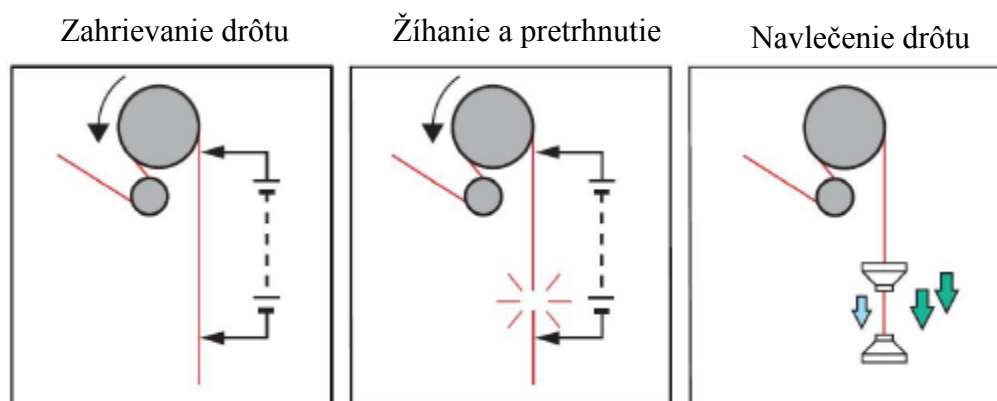
Pri prechode drôtu cez obrobok sa drôt môže pretrhnúť. V takom prípade je nutné drôt znovu navliecť, čo je možné urobiť:

- manuálne,
- automaticky.

Keďže ručné navliekanie drôtu je vysoko neproduktívne, je súčasťou moderných elektroerozívnych drôtových strojov systém automatického navliekania drôtu. V súčasnosti sa vyžívajú tri spôsoby automatického návleku drôtu [8]:

Automatické navliekanie drôtu so zdvojeným servomechanizmom

Proces automatického návleku drôtu je uskutočnený ohriatím drôtu prechodom elektrického prúdu a jeho následným ochladením. Zároveň je drôt protibežne natáľovaný, až dôjde k jeho pretrhnutiu. Drôt je zoštíhlený a vyžíhaný, čo napomáha návleku cez diamantový otvor vodítok. Tento spôsob umožňuje návlek drôtu aj pod hladinou, takže nie je nutné, aby bola dielektrická kvapalina z priestoru odstránená, čo v konečnom dôsledku výrazne skracaie čas. Princíp je zobrazený na obr. 18.



Obr. 18 Princíp návleku drôtu so zdvojeným servomechanizmom [19].

Automatické navliekanie drôtu žihaním a následným odstrihnutím.

Na rozdiel od predchádzajúcej metódy, tu dochádza po vyžihnutí k prestrihnutiu drôtu. Po vyžihnutí je drôt tuhý a vďaka tomu je možné prevliecť cez vodička samostatne, alebo pomocou prúdu dielektrika. Týmto spôsobom je možné prevliecť drôt štartovacím otvorom, ale aj v mieste, kde došlo k pretrhnutiu drôtu [8].

Automatické navliekanie pomocou vodnej trysky.

Používa sa systém automatického strihu prúdovým impulzom a navlečenie pomocou vodnej trysky prúdom dielektrika, pričom na spodnej tryske sa vytvorí podtlak pre jednoduchší prechod drôtu. Cyklus je rýchly a trvá približne 10 s.

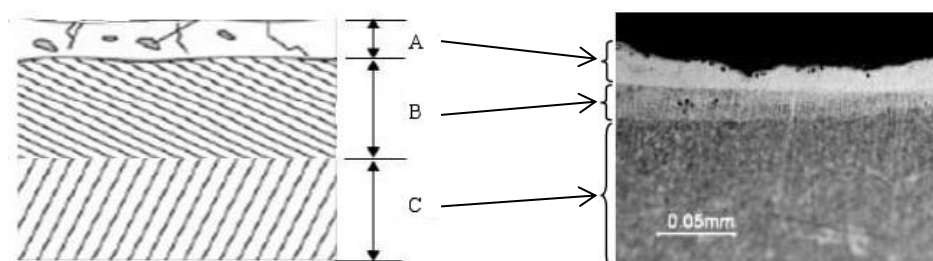
Ďalšie systémy navliekania drôtu pracujú na princípe viackontaktného dotyku špeciálnych vodičok s drôtom. V tomto prípade nie je nutné žihanie drôtu [8].

2.4. Charakter povrchu po rezaní drôtovou elektródou

Charakter povrchu po obrábaní elektroerozívnymi technológiami je rozdielny ako povrch získaný konvenčným spôsobom. Povrch už nie je tvorený stopami po nástroji, ale tvoria ho štatisticky nepravidelne rozmiestnené krátery po jednotlivých výbojoch. Preto charakteristika povrchu bude vo všetkých smeroch rovnaká. Práve vďaka veľmi dobrým povrchovým vlastnostiam po obrábaní, sa mnohokrát uprednostňuje elektroerozívne obrábanie pred konvenčnými spôsobmi obrábania [1, 2].

Keďže mikrageometriu tvoria krátery vzniknuté po jednotlivých výbojoch, kvalitu povrchu určuje energia jednotlivých výbojov. Platí, že lepšia kvalita povrchu je dosiahnutá pri menších hodnotách prúdu, počas krátkej doby trvania impulzov a pri vysokých frekvenciách výbojov. Pritom však rastie opotrebenie nástrojovej elektródy z dôvodu veľkého merného tepelného zaťaženia tejto elektródy. Dosiahnutá rezná plocha je matná, ale často má menšie hodnoty drsnosti ako pri brúsení [1, 17].

V mieste výbojov je dosahovaná teplota od 8 000–12 000 °C, preto sa materiál elektród taví a čiastočne odparuje. Vplyvom vysokých teplôt dochádza taktiež k štrukturálnym a chemickým zmenám. Tepelne ovplyvnená oblasť je charakterizovaná 3 vrstvami ako je vidieť na obr. 14 [2, 10].



Obr. 19 Schematický rez (vľavo) obrobeného materiálu a popis vrstiev, reálny rez (vpravo) [10].

- oblasť A – tzv. epitaxiálna mikrovrstva - vzniká na natavenom a rýchlo zakalenom povrchu s hrúbkou od 10-40 μm ,
- oblasť B – kontaminovaná oblasť – sú v nej viditeľné stopy materiálu rezacieho drôtu,
- oblasť C – biela vrstva – silne nahličená stuhnutá tavenina, vykazuje tvrdosť 60 HRC.

Práve vznik bielej vrstvy je charakteristický pre obrábanie technológiou drôtového rezania. Hoci sa táto vrstva javí ako homogénna, pri mikroskopickom skúmaní je vidno jej laminárny charakter. V závislosti od energie impulzov dosahuje hrúbku až niekoľkých desiatín milimetra. Obsahuje stopy materiálu nástroja. Príčinou vzniku tejto vrstvy je impulzné pôsobenie tepelných účinkov výbojov na povrchovú vrstvu obrábaného materiálu [1, 2, 17].

Vplyvom tepelných účinkov vznikajú v povrchovej vrstve zvyškové napätia, ktoré sú následkom kryštalizácie a fázových premien v obrábanom materiáli. Veľkosť napätí závisí taktiež od parametrov impulzov, materiálových vlastností obrobku a mechanických vlastností vzniknutej povrchovej vrstvy. Pri určitých podmienkach obrábania môže hodnota zvyškových napätí prekročiť medzu pevnosti a dôjde k vytvoreniu mikrotrhlín [2, 9].

2.5. Rozmerová presnosť po rezaní drôtovou elektródou

Rozmerovú presnosť určuje presnosť kinematických celkov stroja, presnosť výroby nástrojovej elektródy, presnosť nastavenia elektródy voči obrobku, presnosť výmeny nástrojov elektródy, presnosť prúdenia dielektrika v mieste obrábania a vo veľkej miere závisí od medzery medzi elektródou a obrobkom (pri hrubovaní medzi elektródou a medzera väčšia ako pri dokončovaní). Dosahovaná presnosť rozmerov sa pohybuje v rozmedzí $\pm 0,001$ mm. K tomuto však treba pripočítať chyby zapríčinené nesprávnou polohou pracovnej elektródy (vplyv vôle pohybových mechanizmov, nepresným upnutím, nízkou tuhosťou stroja). Ďalším faktorom na presnosť rozmerov je čistota dielektrickej kvapaliny. Po zohľadnení všetkých týchto činiteľov je možné definovať tzv. efektívnu pracovnú presnosť, ktorá určuje reálne dosiahnuteľné tolerancie pri elektroerozívnom obrábaní. Hodnoty efektívnej presnosti sa u bežných strojov pohybujú okolo $\pm 0,01$ mm [2, 4].

2.6. Generátory pre drôtové rezačky

Generátor elektrických impulzov je najdôležitejšou časťou každého zariadenia využívajúceho elektroeróziu. Ovplyvňuje hlavné technologické parametre WEDM obrábania.

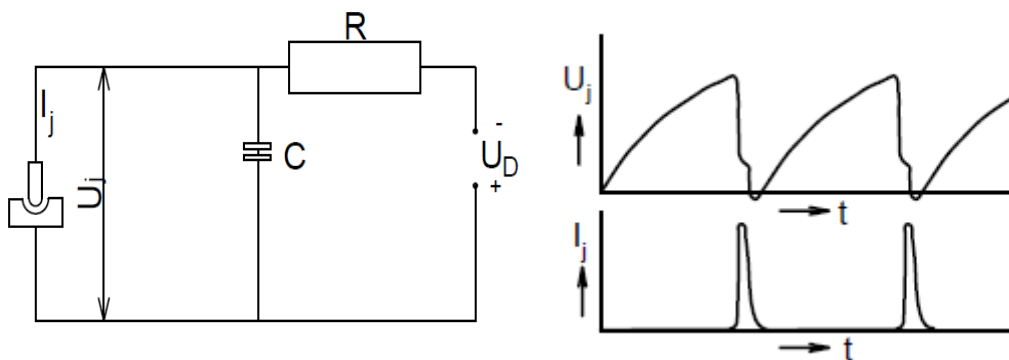
2.6.1. Druhy a popis jednotlivých generátorov

Podľa charakteru zaťaženia a reakcie delíme generátory na [11]:

- závislé (relaxačné),
- nezávislé,
- polovodičové,
- striedavé.

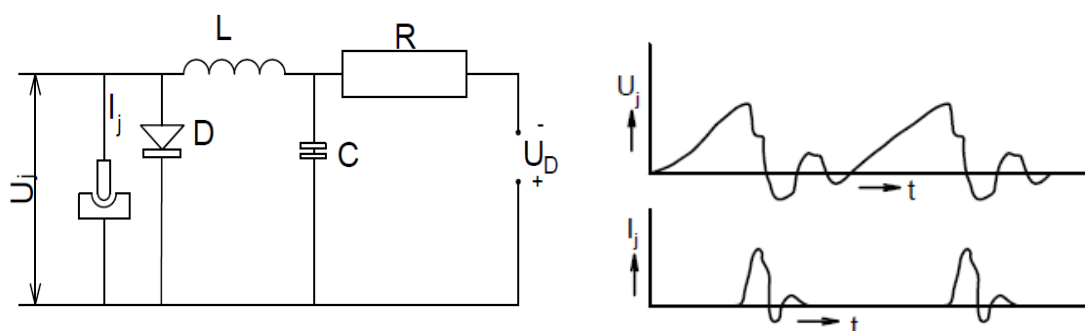
Závislý (relaxačný) generátor

Je najstarší z uvedených typov generátorov. Pracuje na princípe opakovaného nabíjania a vybíjania kondenzátoru C cez elektrický odpor R , po tom, čo napätie dosiahne hodnotu prerazového napätia dielektrika U_c medzi elektródami. Toto napätie závisí od čistoty dielektrika a vzdialenosti medzi pracovnými elektródami. Veľkou výhodou týchto generátorov je konštrukčná jednoduchosť. Nevýhodou je však mala dosahovaná výbojová energia a vysoké opotrebenie nástrojovej elektródy (viď obr. 20).



Obr. 20 Schéma RC generátora a grafická závislosť priebehu napätia U a prúdu I na čase t [11].

Pridaním cievky do obvodu vzniká klasický RLC obvod. Pridaním cievky sa zmení časový priebeh vybíjania, čo má za následok zvýšenie produktivity o štvrtinu. Pre odstránenie rizika spätného prierazu sa paralelne do obvodu zapája dióda (viď obr. 21) [11, 4].

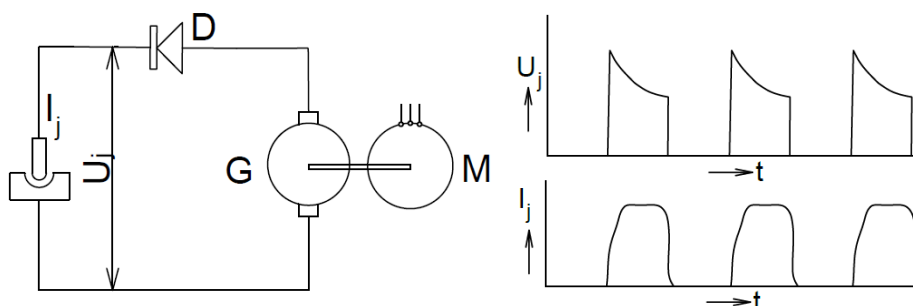


Obr. 21 Schéma RLC generátora a grafická závislosť priebehu napätia U a prúdu I na čase t [11].

Nezávislé rotačné generátory

Nezávislý rotačný generátor sa skladá z asynchrónneho motora M , ktorý poháňa dynamo. V obvode je zapojená polovodičová dióda, ktorá bráni prierazu v opačnom smere (viď obr. 22). Pri tomto type generátorov sa kladný pól pripája na nástroj (anóda) a záporný pól na obrobok (katóda). Nevýhodou je nutnosť využiť prídavný RL generátor pre dokončovanie [1, 2].

Parametre obrábania ako amplitúda impulzov, polarita, frekvencia je možné nastavovať nezávisle na situácii v iskrisku. Využívajú sa pri hrubovaní, pretože umožňujú veľké výkony jednotlivých impulzov, a tým veľký úber materiálu.

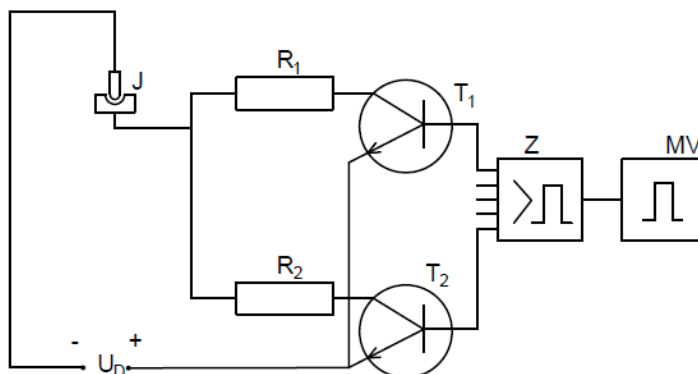


Obr. 22 Schéma rotačného generátora a grafická závislosť priebehu napätia U a prúdu I na čase t [11].

Polovodičové generátory

Výhodou týchto generátorov je najmä ich vysoká spoľahlivosť, vďaka použitiu polovodičových prvkov ako sú výkonové tranzistory T_1 , T_2 . V praxi sa tiež využívajú pre možnosť meniť elektrické parametre v širokej škále hodnôt. Ako príklad je možné uviesť tranzistorové generátory, ktoré umožňujú meniť rozsah frekvencie od 50 Hz do 500 Hz.

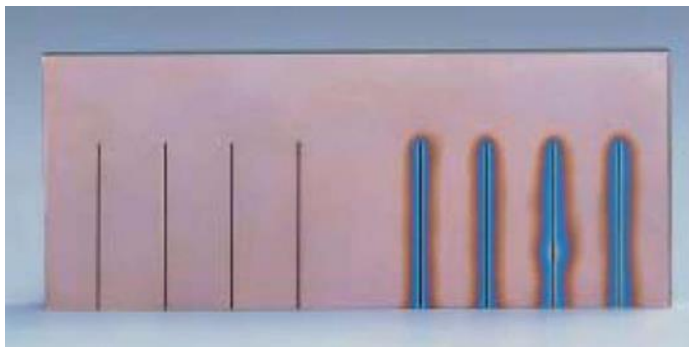
Princíp polovodičového generátora je na obr. 23. Multivibrátor MV dodáva impulzy do zosilňovača Z, ktorý budí zosilnenými impulzmi výkonové tranzistory T_1 , T_2 , ktorých počet určuje prúd privádzaný do iskriska. Frekvencia a spínací pomer je určený multivibrátorom MV [11].



Obr. 23 Schéma polovodičového generátora [11].

Striedavé generátory

Tieto generátory sú v dnešnej dobe najpoužívanejšie. Hlavnou výhodou je fakt, že pri použití jednosmerného zdroja elektrického napätia dochádza k presúvaniu iónov jedným smerom, čo má za následok koróziu vyerodovaných častíc. Na rozdiel od jednosmerných generátorov, striedavý generátor napätie strieda, a tým koróziu potlačuje. Ďalším pozitívom je zmenšená pracovná medzera a s tým súvisiace zníženie objemu odoberaného materiálu. Taktiež je rozdiel aj v štruktúre obrábaného materiálu. Ovplynená oblasť elektroeróziou sa použitím striedavých generátorov zmenšila o 50 % [19, 20].



Obr. 24 Rozdiel pri rezaní za pomoci AC generátora (vľavo) a pri použití DC generátora (vpravo) [12].

2.7. Dieletrická kvapalina

Elektrické výboje vznikajú prevažne v kvapalnom prostredí. Táto kvapalina je nazývaná dielektrikum. Dielektrikum musí spĺňať tieto požiadavky [1, 2]:

- musí mať malú viskozitu a dobrú zmáčavosť pre rýchle obnovenie izolácie po výboji,
- musí byť chemicky neutrálna, aby neiniciovala vznik korózie,
- musí mať dostatočnú teplotu horenia, aby nedochádzalo ku vznieteniu,
- pri jej odparovaní nesmú vznikať jedovaté plyny a zápach,
- musí byť stála, ľahko vyrobiteľná a lacná,

- musí zabezpečiť dobrý odvod splodín z obrábaného miesta a chladiť elektródy,
- pomocou tvorby vodivých mostíkov musí zabezpečovať elektrický prieraz na vhodnú vzdialenosť elektród tak, aby prechod prúdu medzi oboma elektródami vyústil do výboja. Výbojové napätie je variabilné podľa typu obvodu (pri relaxačných obvodoch býva 60-300 V).

V súčasnosti sa používajú ako dielektriká ľahké strojné oleje, transformátorové oleje, najčastejšie však priemyselný petrolej. Ďalej používanými dielektrickými kvapalinami sú kerozín, silikonový olej, dielektriká na báze vody. Tieto kvapaliny sú najviac využívané pri technológii elektroerozívneho hĺbenia [4].

Najnovšie sa začala používať deionizovaná destilovaná voda, ktorá sa doporučuje pre jemné obrábanie pri EDM, kvôli jej požiarnej bezpečnosti, nízkej cene, viskozite a vodivosti. Destilovaná voda sa používa pri elektroerozívnom rezaní drôtovou elektródou (WEDM) [4].

Úlohou dielektrika je aj odplavovanie produktov erózie, ktoré sú vo forme pevnej látky alebo plynu. Tieto látky sú zachytávané na elektródach, vytvárajú izolačnú vrstvu, a tým znemožňujú elektroerozívne obrábanie. Pre stabilný proces obrábania je dôležitou podmienkou rýchla obnova čistoty dielektrika a rýchle odplavovanie odpadových produktov erózie z oblasti opracovania. Čistotu dielektrika zabezpečujú kazetové filtre (pre častice s veľkosťou 2-5 μm) [2, 24].

Cirkulácia dielektrika zabezpečuje odvod väčších častíc z miesta obrábania, ktoré sú usadzované v spodnej časti nádrže ako kal. Na privod dielektrickej kvapaliny do miesta obrábania sú používané čerpace systémy [2, 4]:

- nasávanie dielektrickej kvapaliny cez obrobok,
- nasávanie dielektrickej kvapaliny cez nástroj,
- vstrekovanie dielektrickej kvapaliny cez obrobok,
- vstrekovanie dielektrickej kvapaliny cez nástroj,
- ponorenie do dielektrickej kvapaliny (použitie pri obrábaní plytkých profilov).

2.7.1. Dielektrický systém

Funkciou dielektrického systému je udržiavať konštantný stav deionizácie vody v systéme stroja. Proces elektroerózie znečisťuje vodu dvoma spôsobmi:

- pevné častice – stuhnuté vyerodované častice z materiálu obrobku a nástroja,
- kovové soli – produkt elektroerózie, rozpustené v deionizovanej vode, zvyšujú vodivosť dielektrika, čo znižuje účinnosť výboja.

Kovové soli sú odstraňované deionizačným subsystémom, ktorý pozostáva z čerpadla, riadiaceho systému, deionizačnej vane a nádoby s deionizačnou živicom. Na ich odstránenie sa používa deionizačná živica (viď obr. 25), ktorej množstvo reguluje riadiaci systém, podľa aktuálneho stavu vodivosti dielektrika. Pevné častice sú odstraňované filtračným systémom. [24].



Obr. 25 Deionizačná živica

2.8. Produktivita procesu rezania technológiou WEDM

Produktivita procesu rezania pomocou drôtovej elektródy je závislá od viacerých parametrov. V zátvorkách sú uvedené skratky, ktoré využívajú stroje od výrobcu Fanuc.

Doba impulzu – (ON)

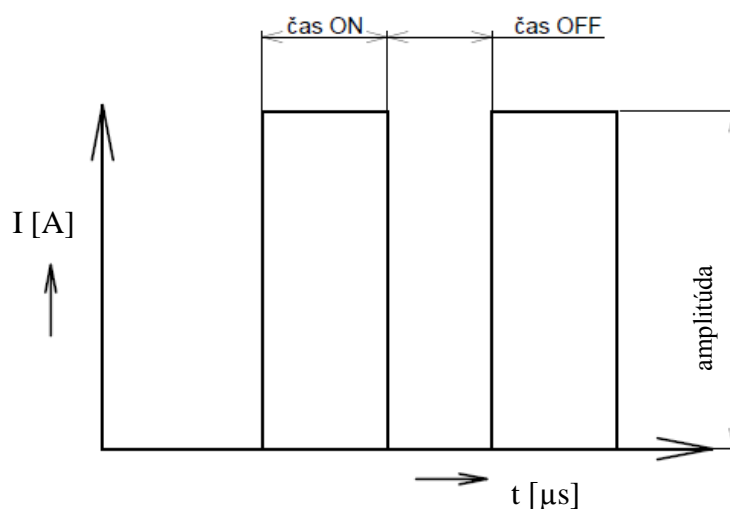
Udáva sa v mikrosekundách (viď obr. 26) a udáva čas počas ktorého je napätie privádzané do medzery, kde dochádza k výbojom. Čím väčšia je táto hodnota, tým väčšie množstvo energie je privedené do miesta rezu, a tým je väčšia hodnota odobraného materiálu. Na druhej strane však rastie drsnosť povrchu, hrúbka bielej vrstvy a tepelne ovplyvnená vrstva [6, 15, 17, 21].

Doba pauzy – (OFF)

Je časový údaj taktiež udávaný v mikrosekundách (viď obr. 26) a udáva dobu medzi výbojmi. Je to čas pre výplach vyerodovaných častíc materiálu z miesta rezu pred ďalším výbojom, aby došlo ku stabilizácii rezného procesu. Predĺžením tejto doby sa znižuje rezná rýchlosť aj množstvo odobraného materiálu [6, 15, 17, 21].

Amplitúda – (VM)

Jeden z dôležitých parametrov pri určovaní charakteru obrábania technológiou WEDM. Určuje maximálnu hodnotu prúdu dosiahnutú pri rezaní (viď obr. 26). Nastavuje sa podľa požadovanej drsnosti povrchu. Čím väčšia hodnota je nastavená, tým je vyššia rýchlosť rezania, ale zároveň rastie riziko pretrhnutia drôtu [6, 15, 17, 21].



Obr. 26 Znázornenie časov ON a OFF s príslušnou amplitúdou

Servonapätie (SV)

Servomechanizmus je zariadenie pre monitorovanie rozdielu napätí v mieste obrábania a nastavenej referenčnej hodnoty tzv. servonapätie. Tento údaj je potrebný pre kontrolu pohybu stola tak, aby udržiaval konštantnú medzeru výboja. Ak napätie dosahované v mieste rezu poklesne na nastavenú hodnotu servonapätia, je korigovaná rýchlosť posuvu a rezanie je uvedené do stabilného stavu. Čím je nastavené napätie servomechanizmu nižšie, tým je vyššia rýchlosť rezania. Príliš malá hodnota vedie k nestabilite výboja a k pretrhnutiu drôtu [6, 15, 17, 21].

Napätie naprázdno (VS)

Hodnota napätia dodávaná do miesta výboja. Určuje hodnotu napätia potrebnú na preskočenie iskry medzi drôtom a obrobkom. Čím je hodnota väčšia, tým je výboj silnejší [6, 15, 17, 21].

Tlak výplachu (FR)

Je to dôležitá hodnota pre stabilné a efektívne obrábanie. Výplach je dôležitý pre odvod tepla a nečistôt spôsobených rezaním z miesta rezu. Táto hodnota udáva prietok a tlak vody dodávanej z vodnej trysky. Čím je hodnota nastavenia vyššia, tým je prietok vody vyšší a vzrastá rezná rýchlosť na úkor presnosti [6, 15, 17, 21].

Odvin drôtu (WF)

Tento parameter určuje rýchlosť akou je drôt odvíjaný z cievky. Pri prechode miestom rezu je drôt opotrebovávaný. To znamená, že pri nastavení nízkej hodnoty odvinu dochádza k pretrhnutiu drôtu a znižuje sa kolmosť stien na obrobku. Obvykle sa nastavuje nízka hodnota pri tenkých obrobkoch a vysoká hodnota pri obrobkoch s veľkou hrúbkou [6, 15, 17, 21].

Napnutie drôtu (T)

Pri obrábaní drôt vibruje a znižuje presnosť rezania. Pre odstránenie týchto vibrácií sa nastavuje potrebná hodnota napnutia drôtu. Čím vyššia je hodnota napnutia, tým je väčšia presnosť obrábania, ale zároveň vplyvom ťahového zaťaženia dochádza k častejšiemu pretrhnutiu drôtu [6, 15, 17, 21].

Miera odstraňovania materiálu (MRR)

Táto hodnota je používaná ako referenčná hodnota pre porovnávanie rýchlosti obrábania pomocou technológie WEDM. Je to z toho dôvodu, že hodnota rýchlosti rezania je pri technológii WEDM veľmi závislá na hrúbke obrábaného materiálu [6, 18].

MRR (Material Removal Rate) sa vypočíta na základe vzťahu:

$$MRR = \frac{(m_1 - m_2)}{t_1 \cdot \rho} \quad [mm^3 \cdot s^{-1}] \quad (13)$$

Kde:

- MRR $[mm^3 \cdot s^{-1}]$ - miera odstraňovania materiálu
- m_1 [g] - hmotnosť obrobku pred obrábaním
- m_2 [g] - hmotnosť obrobku po obrábaní
- t_1 [s] - čas rezného procesu
- ρ $[g \cdot mm^{-3}]$ - hustota obrábaného materiálu

Hodnota MRR rastie s nastavenou vyššou hodnotou času ON, amplitúdy VM a znižuje sa s nárastom hodnoty času OFF a servonapätia [18].

2.9. Výhody WEDM

Hlavné výhody, využívania technológie WEDM v praxi sú [1, 2, 4, 6]:

- drôtovou elektródou je možné obrábať všetky vodivé materiály, bez ohľadu na ich tvrdosť (je možné obrábať materiály ako nástrojové ocele, hliník, meď ale aj titánové zliatiny a vodivé keramiky),
- obrábanie je uskutočňované tenkou elektródou, preto je možné vytvárať kontúry rozličných tvarov a zložitosti, s použitím malých zaoblení v rohoch,
- keďže pri elektroerozívnom obrábaní nedochádza k priamemu kontaktu medzi nástrojom a obrobkom, znamená to, že nástroj neprenáša na obrobok žiadne mechanické sily v porovnaní s konvenčnými technológiami,
- keďže na obrobok nepôsobia mechanické sily, je na upnutie obrobku potrebná niekoľkonásobne menšia sila, čo znamená, že nedochádza k deformácii obrábaného materiálu pri upínaní (je možné obrábať aj krehké materiály),
- po obrábaní drôtovou elektródou nevznikajú na povrchu nadbytočné otrepy, a preto je eliminovaná nutnosť použitia ďalších dokončovacích operácií,
- proces je plne automatizovaný, čo znamená väčšiu produktivitu a umožňuje operátorom vykonávať iné operácie počas procesu rezania,
- vďaka plne automatizovanému procesu rezania, môže stroj pri dlhých časoch pracovať v bezobslužnom režime (napr. počas nocí a sviatkov).

2.10. Nevýhody WEDM:

Hlavnou nevýhodou technológie drôtového rezania je nízka produktivita procesu, pretože je dosahovaná veľmi malá rezná rýchlosť a tým vysoký čas obrábania. Preto je táto technológia využívaná pri výrobe menších, tvarovo zložitých súčiastok.

Medzi ďalšie nevýhody patrí vysoká spotreba rezného materiálu a jeho podiel na sadzbe za hodinu rezania. Taktiež významnú položku tvorí aj spotreba elektrickej energie [4].

2.11. Použitie WEDM

Okrem už spomínaných oblastí využitia, technológia WEDM nachádza svoje uplatnenie aj pri [1, 2]:

- výrobe lisovacích nástrojov, prípravkov, kalibrov,
- výrobe presných tvarovo zložitých súčiastok,
- presnom obrábaní ocelí, tvrdých kovov (titan a jeho zliatiny), opracovanie doštičiek zo spekaných karbidov, kubického nitridu bóru, polykryštalického diamantu, vodivých keramických materiálov ako SiC, TiN.

3 APLIKÁCIA ELEKTROISKROVÉHO DRÔTOVÉHO OBRÁBANIA V MALEJ STROJÁRENSKEJ FIRME

3.1. Predstavenie spoločnosti FOR MIX s.r.o. Trenčín

Spoločnosť FOR MIX s.r.o. vznikla v r.1997. Jej hlavným výrobným programom je výroba strihacích a tvarovacích nástrojov a foriem pre lisovanie plastov a gúm. Hlavnými zákazníkmi sú firmy pôsobiace v automobilovom a elektrotechnickom priemysle. Kvalitné personálne zloženie a technologický park umožňuje spoločnosti FOR MIX s.r.o. ponúknuť svojim partnerom komplexné riešenia v oblasti výroby nástrojov a prípravkov.

Využitie metód elektroiskrového obrábania pri výrobe lisovacích nástrojov je vzhľadom na tvarovú zložitosť jednotlivých dielov široké. V prípade výroby týchto dielov konvenčnými metódami by boli náklady na výrobu vyššie, ako pri použití elektroerozívneho rezania a niektoré tvary by boli dokonca nevyrobiteľné. Použitie elektroiskrového rezania je teda možné považovať za technologickú nevyhnutnosť.

Na drôtových rezačkách sa vyrába viacero dielov jednotlivých tvarovacích nástrojov ako strižníky, strižnice, kotevné dosky, vodiace dosky.

Typický priebeh výroby požadovaného nástroja je nasledovný:

1. zákazník si dodá výkres súčiastky alebo jej 3D model,
2. spracovanie modelu návrhu nástroja konštrukčným oddelením FOR MIX s.r.o.,
3. schválenie návrhu a odsúhlasenie so zákazníkom, prípadne jeho korekcie,
4. vypracovanie výrobnej dokumentácie,
5. spracovanie technologickej dokumentácie,
6. výroba a kontrola jednotlivých dielov,
7. kompletná montáž zostavy nástroja,
8. odskúšanie nástroja a výroba prvých kusov na dielni FOR MIX s.r.o.,
9. dodávka nástroja k zákazníkovi a výroba overovacej série.

Pre zabezpečenie vyššie uvedených činností je FOR MIX s.r.o. vybavený kompletnými konštrukčnými pracoviskami so softwarom ProENGINEER a SolidWorks. Pri tvorbe NC programov pre trieskové obrábanie je využívaný program SolidCAM a ProENGINEER a pre programovanie elektroerozívnych strojov program Wirecut, dodaný výrobcom zariadení.

3.2. Stroje používané na obrábanie technológiou WEDM

FOR MIX s.r.o. disponuje 3 strojmi pre drôtové rezanie. Dva stroje sú od japonského výrobcu HITACHI s typovým označením 355Z a jeden stroj je od firmy Fanuc s označením ROBOCUT α -C800iB. Na výrobu typického predstaviteľa bol použitý stroj od japonskej spoločnosti Fanuc, ktorá je renomovaným výrobcom EDM strojov.

Ďalším strojom v priemyselnom parku spoločnosti FOR MIX s.r.o., využívajúci jav elektroerózie je hĺbička. Táto elektroerozívna hĺbička je od výrobcu EDM strojov AGIE Charmilles s.r.o.

3.2.1. Popis elektroiskrovej drôtovej rezačky Fanuc

Pre výrobu typického predstaviteľa bol použitý stroj s označením Fanuc ROBOCUT α -C800iB. Tieto stroje sú schopné rezať materiály s hrúbkou do 300 mm, s premenlivou výškou a umožňujú výrobu kónických (šikmých) rezov. CNC systém disponuje simultánnym riadením až 7 osí, čo umožňuje dosahovanie vysokej presnosti obrábania.

Hlavné časti stroja FANUC

Na obr. 27 je zobrazená drôtová rezačka Fanuc používaná firmou FOR MIX s.r.o. s popisom hlavných častí. Hlavné katalógové parametre stroja sú uvedené v tab. 1.



Obr. 27 Hlavné časti stroja Fanuc ROBOCUT α -C800iB [29].

Tab. 1 Parametre stroja FANUC ROBOCUT α -C800iB [21].

Štandardné	
Príkon [kW]	AC 200, 13kWh
Maximálne rozmery obrobku [mm]	1 250 x 975 x 300
Maximálna hmotnosť obrobku [kg]	3 000
Pojazd v osi X a Y [mm]	800 x 600

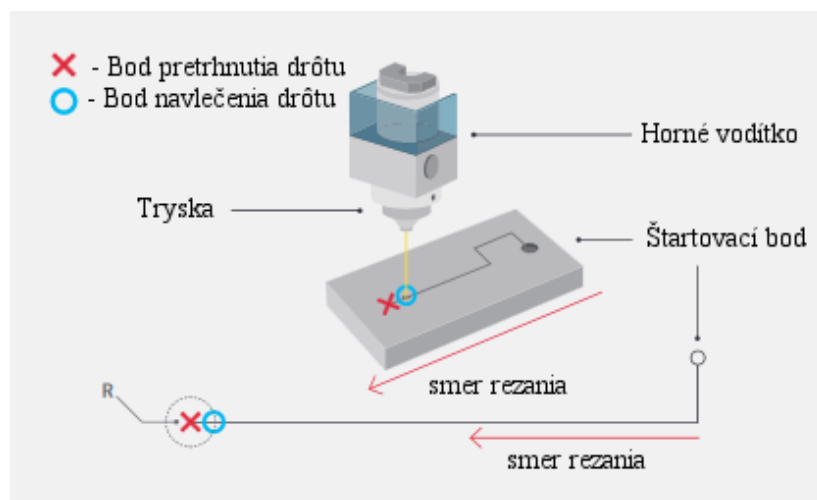
Pojazd v osi Z [mm]	310
Pojazd v ose U a V [mm]	200 x 200
Maximálny uhol skosenia [°/mm]	±30°/150
Minimálny krokový prírastok pohonov [mm]	0,0001
Priemer drôtu [mm]	Ø 0,1–0,3
Maximálna hmotnosť drôtu [kg]	16
Pôdorys stroja [Š/H] [mm]	2 900 x 3 260
Hmotnosť stroja (približná hodnota) [kg]	4200
Riadiaci systém	FANUC 31i-WB
Veľkosť pamäti vnútorného programu [MB]	4
Hlučnosť	
LPA [dB]	64
LPC [dB]	81

Uvedený stroj disponuje funkciami ako:

- automatický návlek drôtu,
- inteligentné polohovanie,
- napínanie drôtu.

Automatický návlek drôtu

Automatický návlek drôtu (AWT) pri tomto type stroja netrvá viac než 10 sekúnd a to pri použití materiálov do hrúbky 150 mm, pričom už nie je nutné, aby sa stroj vracal do štartovacieho otvoru, ale návlek prebieha priamo v drážke rezu (viď obr. 28).



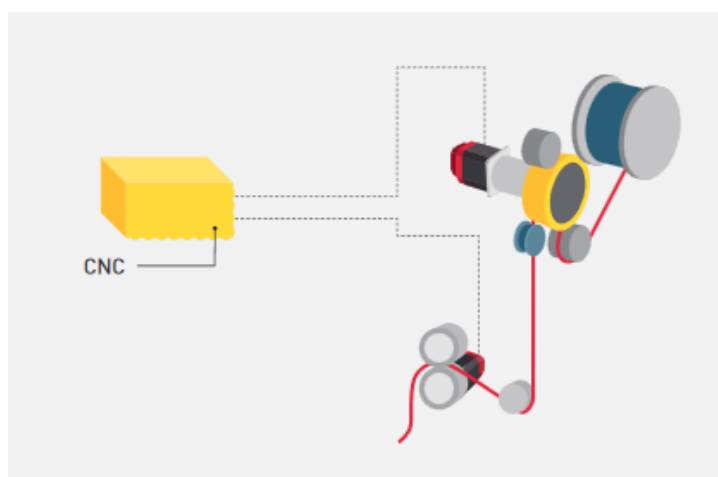
Obr. 28 Systém automatického návleku drôtu (AWT) [21].

Intelligentné polohovanie

Tento stroj je vybavený funkciou Smart Positioning (intelligentné polohovanie), ktorá využíva pre určenie polohy, dotyk s obrobkom. Zrýchlenie procesu polohovania až o 30 % umožňuje systém automatického rozpoznania otvoru pre štartovací bod a automatické nastavovanie parametrov pohybu.

Napínanie drôtu

Tieto typy strojov disponujú dvoma servomotormi pre konštantné napínanie drôtu počas procesu rezania (viď obr. 29). Tento druh napínania dosahuje presnosť napnutia až ± 15 g a vďaka digitálnemu riadeniu napnutia dosahuje konzistentné rezanie. Z toho vyplýva zníženie počtu pretrhnutí drôtu, zvýšenie produktivity obrábania pri nižších nákladoch drôt [21].



Obr. 29 Schéma napínania drôtu pomocou 2 servomotorov [4].

3.3. Voľba drôtu pre technológiu WEDM

Pri operácii drôtového rezania je firmou FOR MIX s.r.o., používaný rezací drôt od dodávateľa ELERO s.r.o. Táto spoločnosť dodáva rôzne druhy drôtov, ktoré sú zobrazené na obr. 30. Spoločnosť FOR MIX s.r.o. využíva drôt s označením ELECUT BRASS. Je to typ bezparafrínového, vysokočistého, mosadzného drôtu, ktorý ponúka najjednoduchšiu a najlacnejšiu možnosť pri výbere drôtov. Tento drôt je dodávaný v zložení CuZn37 (37 % zinku a 63 % medi).

ELECUT BRASS je ponúkaný v rôznych prevedeniach, na základe požadovanej pevnosti v ťahu. Mosadzné drôty sa vyrábajú v radách 900 N/mm², 500 N/mm². Ďalším potrebným parametrom pre výber drôtu je priemer drôtu. Tento typ drôtov je vyrábaný v priemeroch 0,10; 0,15; 0,20; 0,25 a 0,30 mm [25].



Obr. 30 Dodávané materiály spoločnosti ELERO s.r.o. [25].

3.4. Tvorba NC programu

NC program je možné vytvoriť dvoma spôsobmi:

1. Vytvorenie programu priamo na paneli drôtovej rezačky. Tento spôsob sa využíva len pre jednoduchšie výrobky.
2. Vytvorenie programu pomocou softwaru Wirecut. Software Wirecut je súčasťou dodávky stroja Fanuc. Využíva sa pre výrobky zložitejšieho tvaru, kde vytvorenie NC programu trvá dlhšie.

Vstupným podkladom pre tvorbu NC programu sú dáta dráhy vytvorené v bežných CAD programoch, prípadne je dráha rezu vytvorená priamo v prostredí softwaru Wirecut. Vzhľadom na to, že modelovanie v softvare Wirecut je zložitejšie a časovo náročnejšie, FOR MIX s.r.o. využíva pre tvorbu modelu software ProENGINEER.

3.4.1. Popis programu WIRECUT

Pre tvorbu programu bol použitý software WIRECUT. Jedná sa o relatívne jednoduchý a intuitívny program. Pre vytvorenie programu rezania programátor využíva postupne štyri moduly: CAD, CONIC, TECHNO a NC-SIM.

CAD

Modul CAD je využívaný na úpravu kriviek rezania. Vstupom je DXF súbor vytvorený v hociktorom CAD programe (AutoCAD, ProENGINEER, CATIA,...). Tento modul umožňuje i samotné kreslenie, ale pretože je pomerne zdĺhavé, táto funkcia sa veľmi nevyužíva.

CONIC

Slúži pre programovanie úkosových (kónických) rezov. V tomto prípade modul CONIC nebol využitý, pretože rezanie pod uhlom 1° bolo nastavené priamo na stroji prepísaním NC kódu.

TECHNO

V module TECHNO programátor určuje typ rezanej súčiastky (strižník/strižnica), stanovuje miesta a typy nájazdov a výjazdov, prípadne definuje mostíky. Následne zadá druh materiálu, výšku rezaného polotovaru, priemer rezacieho drôtu a počet rezov. Na záver uloží a vygeneruje samotný NC program.

NC-SIM

Modul NC-SIM Je využívaný na zobrazenie hotového programu s reznou kontúrou.

3.5. Voľba počtu rezov

Počet rezov sa stanovuje podľa požadovanej rozmerovej presnosti a drsnosti výsledného rezného povrchu. Pri výrobe nástrojov vo FOR MIX s.r.o. je najčastejšie využívané rezanie na dva rezy - hrubovací a dokončovací. Je to dané tým, že kvalita povrchu po dvoch rezoch dosahuje drsnosť $Ra\ 0,8-1,6\ \mu m$. Drsnosť povrchu za použitia viacnásobného počtu rezov klesá, dokonca je možné dosiahnuť lesklý povrch.

3.5.1. Hrubovací rez

Prvý rez, pri ktorom drôt reže cez plný materiál sa nazýva hrubovací rez. Spravidla bývajú parametre rezania nastavené tak, aby bola dosiahnutá čo najvyššia rýchlosť rezania s čo najväčším množstvom odstráneného materiálu. Každý hrubovací rez má po vygenerovaní NC programu vložený prídavok na rezanie. Obvykle je nastavená väčšia korekcia, väčšia hodnota výplachu pre dosiahnutie vyššej rýchlosti rezania. Napnutie drôtu je nastavené menšie, aby pri prechode cez plný materiál nedochádzalo k pretrhnutiu drôtu. Časy ON a OFF sú nastavené vyššie, tie určujú veľkosť pulzu a veľkosť medzery medzi výbojmi pre výplach. Pri nastavených väčších hodnotách je výboj silnejší. Všetky tieto parametre sú popísané v predchádzajúcich kapitolách.

3.5.2. Dokončovací rez

Pri tomto reze už žiadny prídavok nie je definovaný. Vzrastajúcim počtom dokončovacích rezov rastie aj presnosť rozmerov a drsnosť rezaného povrchu. Hodnota napnutia drôtu je vyššia pre presne kolmé rezanie a je nastavená menšia hodnota korekcie ako pri hrubovacom reze. Na rozdiel od prvého hrubovacieho rezu je nastavený parameter pre riadenie dokončovacích pulzov, ktorý je referenčnou hodnotou pre kontrolu rýchlosti posuvu.

3.5.3. Korekcia

Pri rezaní NC program určuje tvar rezanej kontúry. Pri rezaní drôtom presne po tejto kontúre by vznikli neopraviteľné chyby rozmerov. Výsledné rozmery by:

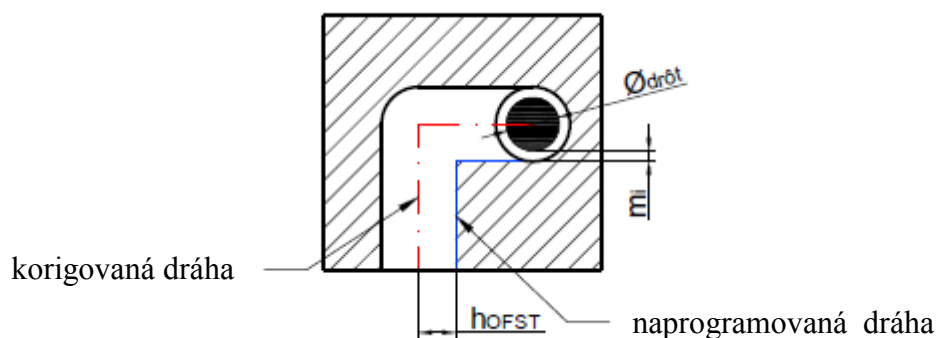
- v prípade rezaní strižníc boli väčšie ako požadované,
- v prípade rezania strižníkov boli menšie ako požadované,

Z tohto dôvodu je nutné, aby sa skutočná dráha líšila od naprogramovanej dráhy o určitú hodnotu, tzv. korekciu (viď obr. 31). Veľkosť korekcie drôtu je daná priemerom drôtu a veľkosťou iskrovej medzery.

$$h_{OFST} = \frac{\varnothing_{drôt}}{2} + m_i \quad (14)$$

Kde:

- h_{OFST} [mm] korekcia
- $\varnothing_{drôt}$ [mm] priemer drôtu
- m_i [mm] veľkosť iskrovej medzery
- T_{FR} [h] ročný časový fond stroja



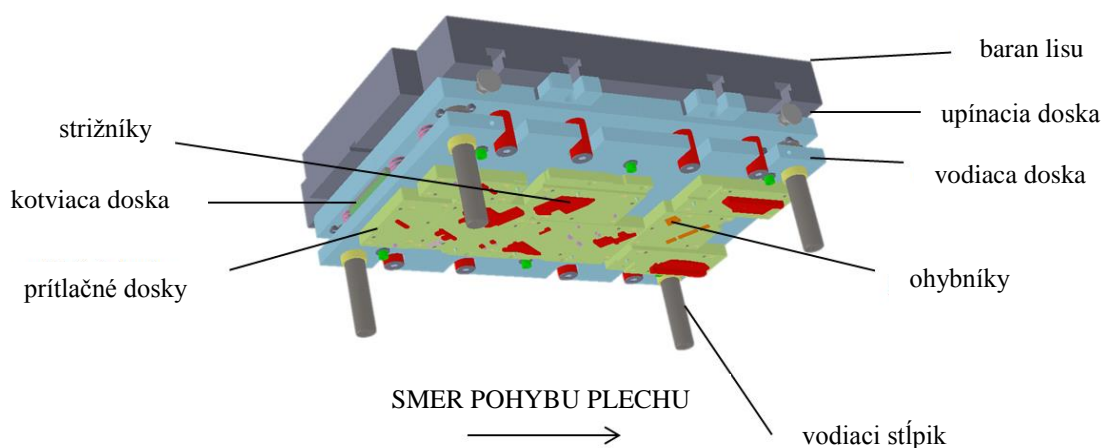
Obr. 31 Korigovaná dráha.

4 TECHNOLÓGIA VÝROBY TYPICKÉHO PREDSTAVITEĽA

Ako typický predstaviteľ zo súčiastok obrábaných na drôtovej rezačke bola vybraná strižnica, ktorá je súčasťou združeného postupového nástroja. Tento nástroj v sebe združuje operácie strihania a ohýbania a hotový výlisok je vyrobený z pásu plechu v šiestich krokoch (zdvihoch lisu).

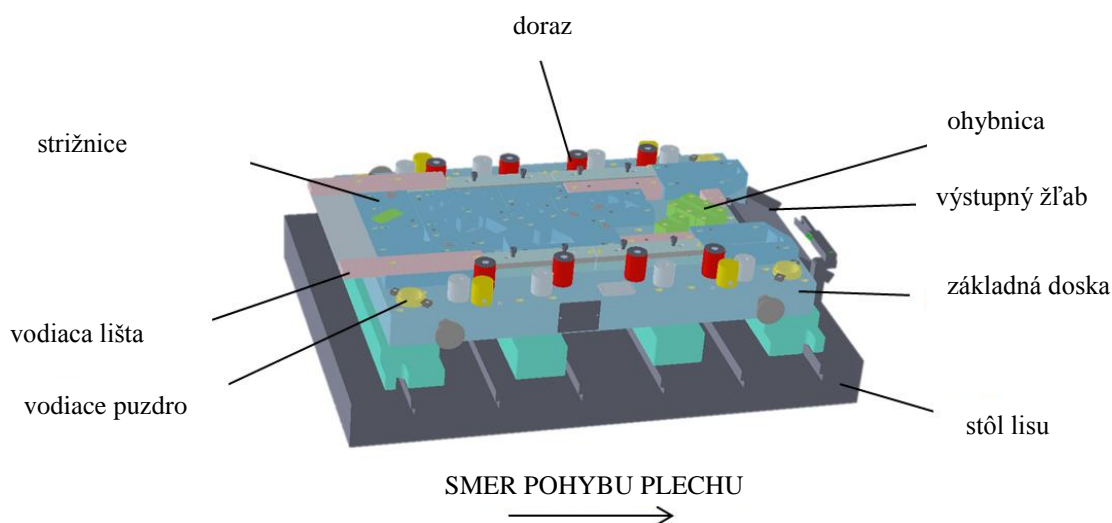
4.1. Voľba typického predstaviteľa

Postupový združený nástroj sa skladá z vrchnej a spodnej časti. Vrchnú časť tvorí upínacia doska, kotviaca doska, vodiaca doska, prítlačná doska, strižníky a ohybničky (viď obr. 32). Vzájomný presný pohyb zabezpečuje vodiaci stĺpik spolu s vodiacim puzdrom v spodnej časti združeného postupového nástroja. Pre presné nastavenie výšky zdvihu sú na nástroji umiestnené výškové dorazy.



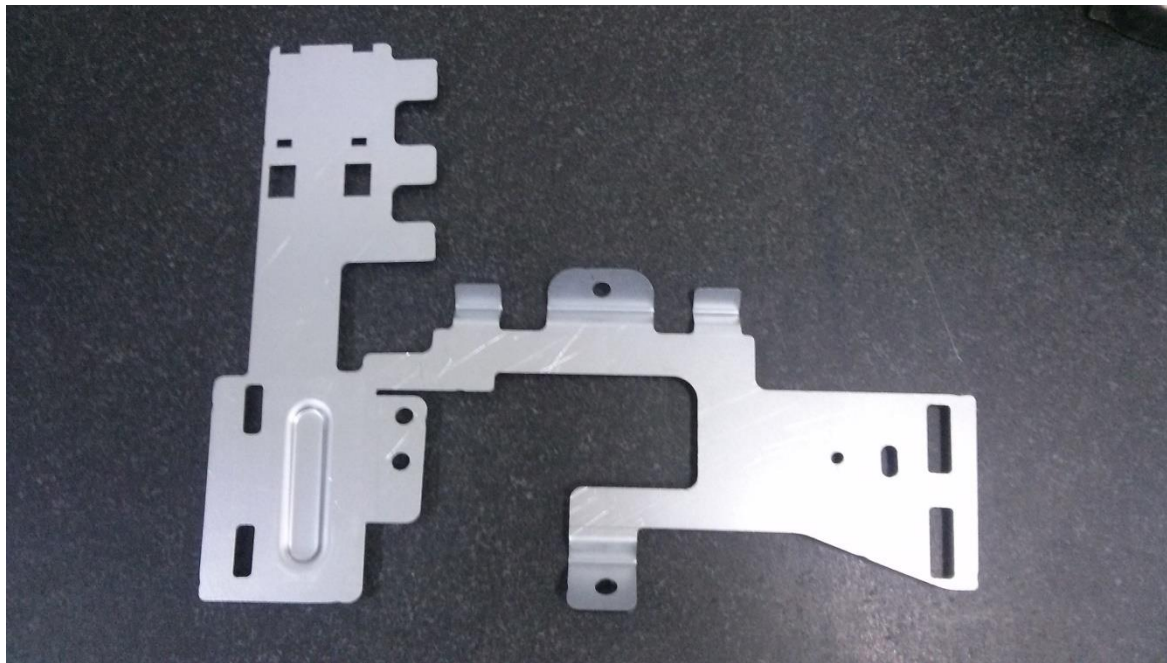
Obr. 32 Vrchná časť postupového združeného nástroja.

Spodnú časť nástroja tvorí základová doska, na ktorej sú uchytené strižnice a ohybnice. Správne polohovanie pásu plechu zabezpečujú vodiace lišty. Na výstupe spodnej časti nástroja je žľab pre vypadávanie hotových kusov na dopravník. Jednotlivé časti sú znázornené na obr. 33.



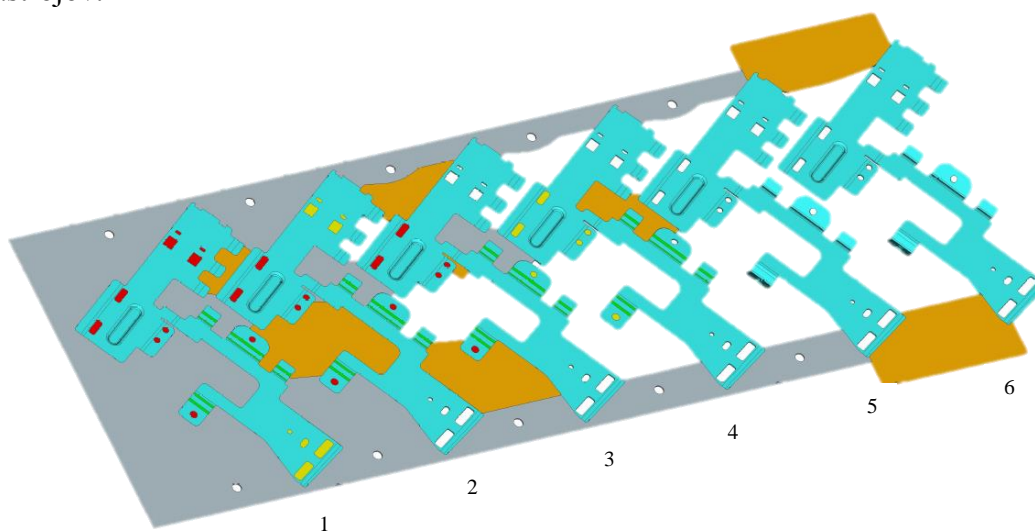
Obr. 33 Spodná časť postupového združeného nástroja.

Polotovár pre výrobu výlisok je pás plechu z materiálu CR340LA, hrúbky 1,5 mm a šírky 355 mm. Hotový výlisok je vyrobený v 6 krokoch – 6 zdvihoch lisu. Dĺžka jedného kroku je 165 mm. Výsledok lisovacieho procesu je vidno na obr. 34.



Obr. 34 Výsledný produkt vystrihnutý z postupového združeného nástroja

Zobrazenie jednotlivých krokov strihania a lisovania je na obr. 35. V prvom kroku je na polotovare vylisovaná drážka a vystrihnuté otvory, do ktorých zapadajú hľadáčky tak, aby v jednotlivých krokoch bola zabezpečená správna poloha polotovaru voči strižníkom. V krokoch 2, 3, 4 sú strižníkmi vystrihnuté jednotlivé žlté-hnedé vyznačené časti plechu. V kroku č. 5 sú vytvorené požadované ohyby. V záverečnom 6. kroku dochádza k oddeleniu hotovej súčiastky od pásu plechu poslednou dvojicou strižných nástrojov.



Obr. 35 Schéma postupu pásu plechu s vyznačenými časťami strihanými v jednotlivých krokoch.

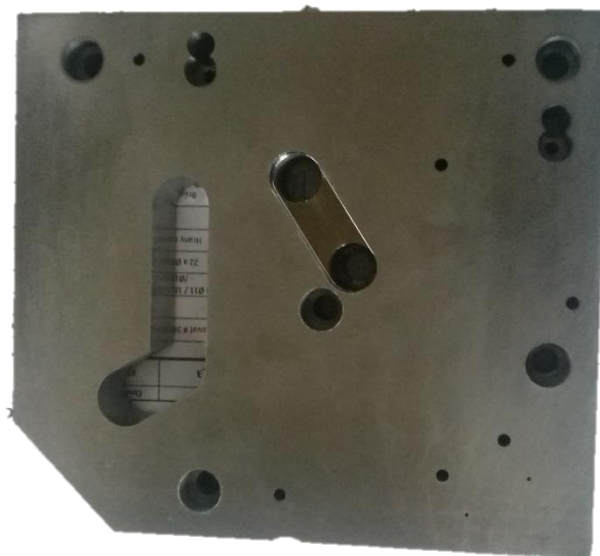
4.2. Postup výroby strižnice

Strižnica v predchádzajúcich častiach popisovaného nástroja sa skladá z 8 častí. Ako typický predstaviteľ výrobného programu bola vybraná strižnica č. 3 z tohto nástroja. V tab. 2 je uvedený zjednodušený technologický postup výroby tejto strižnice.

Tab. 2 Technologický postup výroby strižnice.

Technologický postup	Názov: 1_STRIZNICA_3	Materiál: 1.2379	Polotovár: 255x230x40
Číslo operácie	Triediace číslo/pracovisko	Popis práce	
10	520 Frézka klasická	<ul style="list-style-type: none"> - frézovať polotovár do pravého uhla, - frézovanie polotovaru na 36,4, - frézovať na hotovo 251 a225 - frézovať hranu 46x45° 	
20	561 Brúška rovinná BPH20	<ul style="list-style-type: none"> - plošné brúsenie pred kalením 	
30	523 Obrábacie centrum MAS 750	<ul style="list-style-type: none"> - vŕtať otvor 5x Ø11 a zahĺbenie Ø18 do hĺbky 15mm, - vŕtať 7x Ø5 a 2x Ø2,5, - vŕtať 2x Ø 12 s toleranciou +0,1 - vŕtať zahĺbenie 2x Ø14 do hĺbky 15mm + diery pre závit M6, - frézovať drážku 22 a Ø22 do hĺbky 6mm, - Vyfrézovať priechodziu uvoľňujúcu drážku 26 . 	
40	944 Zámočnícka dielňa	<ul style="list-style-type: none"> - zraziť hrany 3x 2x45° - vyrezať závit 2x M6 	
50	183 Kaliareň	<ul style="list-style-type: none"> - kooperácia, kalit' na HRC 60+2 	
60	561 Brúška rovinná BPH20	<ul style="list-style-type: none"> - brúsiť po kalení 36,4 na 36,1 	
70	598 Drôtová rezačka Fanuc ROBOCUT α-C800iB	<ul style="list-style-type: none"> - rezať 3x Ø10H7, Ø10,2^{+0,1}, a 6x tvarový otvor dané NC programom 	
80	561 Brúška rovinná BPH20	<ul style="list-style-type: none"> - brúsiť na hotovo mieru 36±0,01 	
90	944 Zámočnícka dielňa	<ul style="list-style-type: none"> - čistenie, konzervovanie, prichystať na montáž 	

Všetky operácie uvedené v technologickom postupe boli vykonané v dielňach spoločnosti FOR MIX, okrem operácie 50, ktorá predstavuje tepelné spracovanie, vykonávané v kooperácii. Atest o vykonaní tepelného spracovania je vidieť v prílohe č. 2. Opracovaná súčiastka pred odoslaním na tepelné spracovanie je na obr. 36.



Obr. 36 Materiál pripravený na kalenie

4.3. Materiál strižnice

Strižnica je vyrobená z výkonnej nástrojovej ocele 1.2379 (19 573, X155CrVMo12-1). Je to vysokolegovaná ledeburitická chróm - molybdén – vanadová oceľ s dobrou prekaliteľnosťou rozmerovou stálosťou po kalení, vysokou oteruvzdornosťou a húževnatosťou. Tvrdosť v žíhanom stave je 250 HB [27].

Materiál je určený pre [26]:

- výrobu nástrojov určených pre prácu za studena tzn. nástroje pre strihanie na lisocho do hrúbky strihaného plechu 10 mm,
- nože pre tabuľové a kotúčové nožnice na plech, drôty a pod.,
- nástroje pre tvárnenie ako sú menšie prievlaky a nástroj pre ťahanie, pre tvárnenie a razenie,
- nástroje pre tvárnenie za tepla so zvýšenými nárokmi na tvrdosť a oteruvzdornosť za tepla, kde nie je kladený dôraz na zvýšenú húževnatosť,
- pre výrobu kladív a čeľustí drvičov určených na drvenie a mletie, kde využíva veľmi dobré vlastnosti oteruvzdornosti a húževnatosti,
- pre veľmi namáhané formy.

Tepelné spracovanie materiálu 1.2379 je zobrazené v tab. 3.

Tab. 3 Tepelné spracovanie ocele 1.2379 [27].

Spôsob tepelného spracovania	Teplota [°C]	Popis tepelného spracovania
Žihanie pre zníženie pnutia	600-650	1-2 hodiny a následné pomalé ochladenie v peci
Kalenie	980-1 030	Ochladzovanie v oleji, na vzduchu alebo v soľnom kúpeli
Popúšťanie	150-300	Ochladenie na vzduchu
Kalenie na sekundárnu tvrdosť	1 040-1 080	Ochladenie v oleji, na vzduchu alebo v soľnom kúpeli
Popúšťanie na sekundárnu tvrdosť	500-550	Ochladenie na vzduchu

4.4. Rezací drôt

V spoločnosti FOR MIX s.r.o. je dlhodobo používaný mosadzný drôt ELECUT BRASS s pevnosťou v ťahu 900 N/mm^2 a priemerom $0,25 \text{ mm}$, preto bol použitý aj pre výrobu typického predstaviteľa. Tento drôt je dodávaný na cievke označenej K160 a celkové množstvo navinutého drôtu je 8 kg na jednej cievke.

4.5. Programovanie procesu rezania

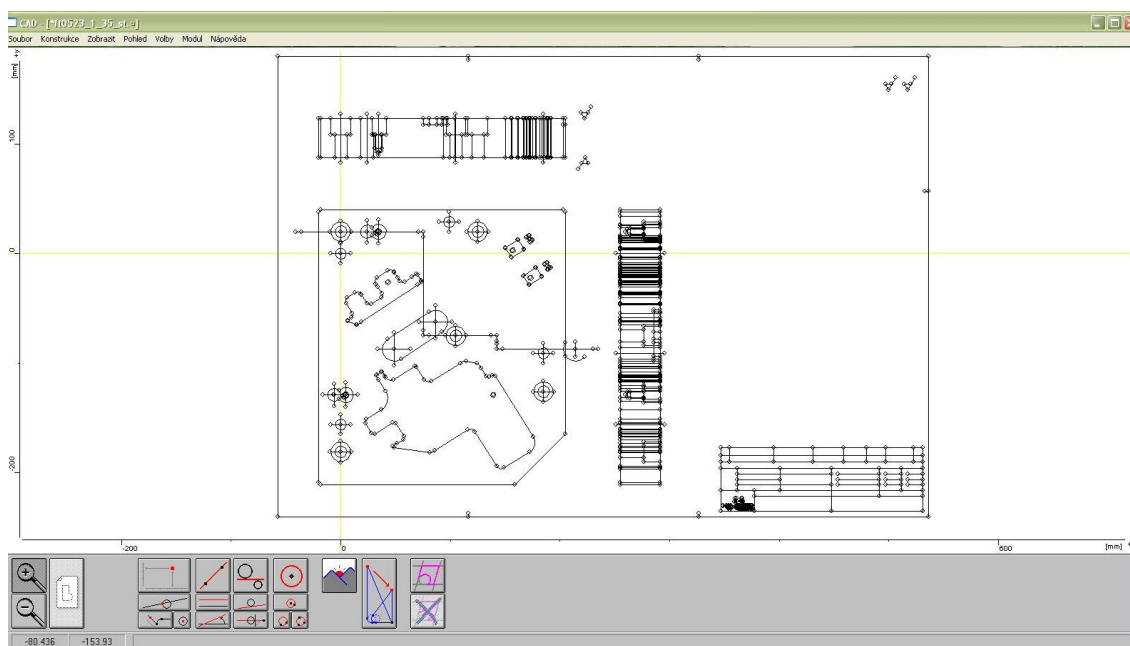
Pre tvorbu programu bol použitý software WIRECUT.

4.5.1. Tvorba NC programu typického predstaviteľa

Pre import súboru je možné využiť jeden z formátov dát podporovaných systémom Wirecut a to DXF alebo IGES. V tomto prípade bol využitý formát DXF a takto vytvorený súbor bol vložený do modulu CAD (viď obr. 37) softwaru Wirecut. Postup programovania:

1. kontrola mierky s vytvoreným modelom,
2. určenie nulového bodu - obvykle sa pri rezaní strižníc volí ako nulový bod presná diera, v tomto prípade diera $\varnothing 10\text{H7}$,
3. vyznačenie jednotlivých kontúr určených pre rezanie - vzhľadom na to, že jednotlivé kontúry predstavujú v tomto prípade vždy uzatvorený tvar, stačí na vyznačenie kontúry vybrať jednu jej časť a zvyšok je automaticky označený.

Keďže všetky vybrané kontúry majú rovnakú toleranciu a to konkrétne, že sa majú vyrábať so strižnou vôľou $0,1\text{mm}$ na stranu, mohli byť vybrané všetky tvary naraz, čím sa vytvoril jeden NC program. V prípade rôznych tolerancií by bolo nutné rozčleniť program na viac častí.

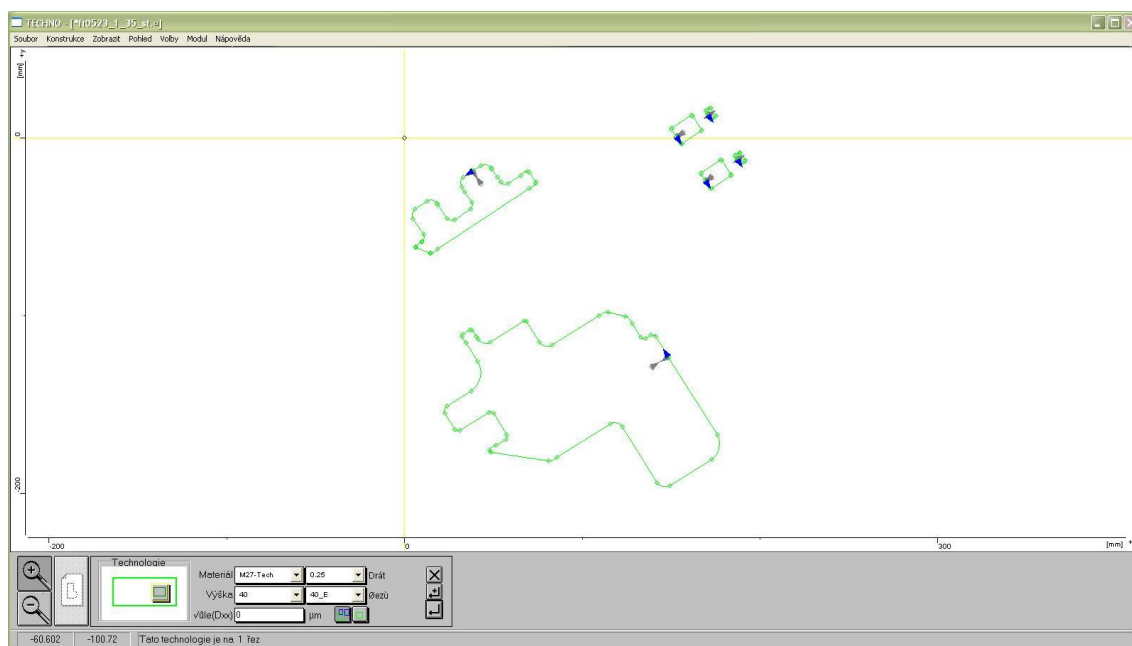


Obr. 37 Zobrazenie súčiastky v systéme WIRECUT v module CAD

Ďalšie programovanie prebehlo v module TECHNO nasledovne:

1. zadanie typu stroja - tým je vlastne určený typ postprocesora, ktorý vytvorený NC kód “preloží” do jazyka stroja,
2. výber štartovacích otvorov - pre každý uzavretý rezaný tvar je vybraný konkrétny štartovací bod pre navlečenie drôtu,
3. výber najbližšej hrany vzhľadom ku štartovaciemu otvoru,
4. určenie typu nájazdu - v tomto prípade bol vytvorený kolmý nájazd na reznú hranu pre všetky rezané kontúry,
5. skontrolovanie automaticky vygenerovaného smeru rezania - všetky otvory boli rezané jedným smerom a to proti smeru hodinových ručičiek,
6. umiestnenie príkazu M01 - pre každý jednotlivý otvor bol do NC programu vložený príkaz M01 s príslušnou hodnotou, čo znamená zastavenie rezu 2 mm pred uzavretím rezu otvoru. Týmto spôsobom boli vytvorené mostíky, ktoré umožnili jednoduché vybranie odrezaného materiálu pomocou elektromagnetov alebo nalepených páskov plechu,
7. zadanie typu materiálu,
8. určenie počtu rezov – podľa požadovanej presnosti a drsnosti povrchu bola výroba určená na hrubovací a dokončovací rez,
9. určenie poradia rezania jednotlivých kontúr – bola zvolená tak, aby bola optimalizovaná dráha obrobku voči rezacej hlave a obrobok nevykonával zbytočné posuvy a taktiež preto, aby nedošlo ku kolízii s upínkami.

Zobrazenie v module TECHNO je vidieť na obr. 38.



Obr. 38 Zobrazenie v module TECHNO s vyznačením rezných dráh, nájazdov a smeru obrábania.

Na základe týchto parametrov software Wirecut vygeneroval NC program v ISO kóde. Finálny NC program s vykreslením tvaru rezanej súčiastky bol zobrazený v module NC-SIM a po jeho kontrole bol uložený na sieťový disk.

4.6. Upnutie obrobku

Pred upnutím operátor stroja polotovar očistil, odmastil a odmagnetizoval. Na upnutie polotovaru na stôl stroja, boli využité univerzálne upínky, ktoré je vidieť na obr. 39. Aby sa zamedzilo kolízii so spodným vodítkom, bola upínaná súčiastka otočená okolo osi X o 180°. Táto zmena bola zaznamenaná do NC programu operátorom stroja.



Obr. 39 Upnutie obrobku na pracovnom stole

4.7. Ustavenie obrobku

Presné ustavenie obrobku je veľmi dôležité, pretože chybné ustavenie môže znamenať nezhodný, neopraviteľný výrobok. Pre ustavovanie boli vopred definované dve navzájom kolmé ustavovacie plochy.

Ustavovanie bolo uskutočnené pomocou číselníkového odchýlkomera značky INSIZE, upnutého na rezacej hlave, ako je vidieť na obr. 40. Tento odchýlkomer dokáže merať s presnosťou 0,001 mm. Dosiahnutá presnosť ustavenia bola 0,005 mm po celej dĺžke príslušnej hrany ako definuje technologická dokumentácia.

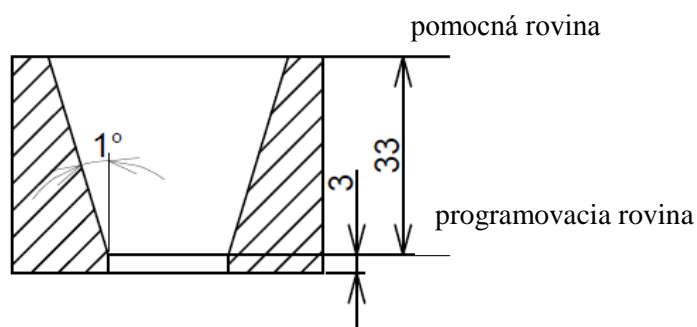


Obr. 40 Ustavenie obrobku na stôl pomocou číselníkového odchýlkomera

4.8. Upravenie vygenerovaného NC programu

Po naimportovaní programu do riadiaceho systému stroja Fanuc boli operátorom skontrolované základné parametre:

- typ a priemer drôtu,
- materiál obrobku,
- typ obrábanej súčiastky,
- nastavenie vzdialenosti vodiťok od obrobku,
- počet rezov,
- otočenie strižnice okolo osi X,
- nastavenie uhlového módu rezu pre prvý rez, to znamená rezanie pod uhlom 1° pre vznik fazetky, prepísaním NC kódu,
- nastavenie kolmého módu rezu pre druhý rez, pre vytvorenie fazetky,
- nastavenie programovacej roviny, ktorá bude 3 mm od spodnej plochy upnutej strižnice a nastavenie pomocnej roviny, ktorá bude totožná s vrchnou plochou a teda vzdialená 33 mm od programovacej roviny vid' obr. 41,
- vloženie strižnej vôle podľa výkresovej dokumentácie $+0,1$ mm.



Obr. 41 Nastavenie kónického rezu 1° pre vznik fazetky.

Keďže boli zvolené 2 rezy a výška rezanej strižnice 36 mm je číslo technológie určené 41 pre prvý rez a 42 pre druhý rez. Následne boli vygenerované prevádzkové parametre, ktoré sú zobrazené v tab. 4.

Tab. 4 Vygenerované hodnoty pre rezanie drôtovou elektródou.

Popis parametru	Skratka v prostredí stroja Fanuc	Hodnoty pre 1. rez	Hodnoty pre 2. rez
Číslo technológie	No.	41	42
Popis		D2.A2/36/25/2R	D2.A2/36/25/22
Číslo rezu	NUM	1	2
Mód rezu	PM	41	41
Napätie naprázdno	VS	3	10
Riadenie prúdu	CC	12	2
Rezne napätie	VM	31	4
T-ON	ON	6	1
T-OFF	OFF	18,8	9
AC/DC	AC	1	1
Servo mód	SVM	1	2
Servo napätie	SV	20	10
Zosilnenie serva	SVG	235	600
Kontrola pulzu A	WP1A	14	0
Kontrola pulzu B	WP1B	5	1
Kontrola offsetu A	WP2A	3	0
Kontrola offsetu B	WP2B	11	2
Napnutie	T	1300	2400
Odvin	WF	10	13
Tlak výplachu	FR	18	3
Druh výplachu	FC	0	0
Rýchlosť	SPD	3,06	5,13
Riadenie dok	SPC	-----	4,0
Riadenie rohov	AIC	30002	30113
Priamosť	STOFST	0	0
Korekcia	OFST	0,214	0,139

Po vytvorení všetkých úprav bol program uložený do pamäte stroja a vykreslený na ovládacom paneli (vid' obr. 42). Následne bola vytvorená simulácia pre zistenie kolízií vodítkov. Po spustení samotného procesu rezania bola vygenerovaná celková dĺžka dráhy rezu na 926,64 mm a predpokladaný čas rezu na 6h 33min.



Obr. 42 Vykreslenie NC kódu v prostredí riadiaceho systému Stroja Fanuc.

Pri dokončovacom reze dochádzalo k trhaniu drôtu. Z tohto dôvodu bola znížená hodnota napnutia drôtu z pôvodných 2 400 na 2 000. Po tejto korekcii už nedošlo k ďalšiemu pretrhnutiu drôtu.

5 TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOTENIE

V tejto kapitole sú podrobnejšie analyzované jednotlivé zložky, ktoré sa podieľajú na výpočte hodinovej sadzby stroja.

Hodinová sadzba stroja N_c je vypočítaná na základe vnútropodnikovej kalkulácie a zahrňuje všetky náklady spojené s prevádzkou stroja:

N_o – Podiel obstarávacích nákladov (viď. kapitola 5.1.)

N_s – Podiel nákladov na spotrebný materiál (viď. kapitola 5.2.)

N_d – Podiel nákladov na drôt (viď. kapitola 5.3.)

N_m – Podiel personálnych nákladov (viď. kapitola 5.4.)

N_e – Podiel nákladov na energie (viď. kapitola 5.5.)

N_u – Podiel nákladov na údržbu (viď. kapitola 5.6.)

N_r – Podiel výrobnéj a správnej réžie (viď. kapitola 5.7.)

5.1. Obstarávacie náklady N_o

Celkové obstarávacie náklady na zakúpenie stroja a jeho uvedenie do prevádzky sú uvedené v tab. 5.

Tab. 5 Obstarávacie náklady.

Položka	cena	jednotka
Obstarávacia cena drôtovej rezačky FANUC	120 000	EUR
CAM systém Wirecut	2 000	EUR
Upínací systém Hirschman	3 000	EUR
Doplňkové školenie operátorov a programátorov	3 400	EUR
Náklady na stavebné úpravy pracoviska	1 000	EUR
Celkové obstarávacie náklady P_o	129 400	EUR
Ročný časový fond stroja T_{FR}	3 952	h
Podiel obstarávacích nákladov na hodinovej sadzbe stroja N_o	5,46	EUR.h⁻¹

Na základe pravidiel pre odpisovanie bola určená doba odpisovania $d_o = 6$ rokov. Podiel obstarávacích nákladov na hodinovej sadzbe stroja je daný vzťahom 15:

$$N_o = \frac{P_o}{d_o \cdot T_{FR}} \quad (15)$$

$$N_o = \frac{129\,400}{6 \cdot 3\,952}$$

$$N_o = 5,46 \text{ EUR} \cdot \text{h}^{-1}$$

Kde:

N_o	[EUR.h ⁻¹]	podiel obstarávacích nákladov na hodinovej sadzbe stroja
P_o	[-]	celkové obstarávacie náklady
d_o	[rok]	doba odpisovania
T_{FR}	[h]	ročný časový fond stroja

5.1.1. Výpočet ročného časového fondu stroja T_{FR}

$$T_{FR} = S_m \cdot T_{Sm} \cdot N_{pd} \quad (16)$$

$$T_{FR} = 2 \cdot 8 \cdot 247$$

$$T_{FR} = 3\,952 \text{ h/rok}$$

Kde:

- T_{FR}	[h]	ročný časový fond stroja
- S_m	[-]	počet zmien za deň (zmennosť)
- T_{Sm}	[h]	pracovný čas na zmenu
- N_{pd}	[-]	počet pracovných dní r. 2017

Na základe výpočtu je časový fond stroja pri dvojzmennej prevádzke 3 952 hodín ročne. Skúsenosti z minulého obdobia ukazujú, že tento časový fond je nedostatočný, a preto sa navyšuje prípadným zaradením tretej zmeny, prácou počas víkendu alebo prípadnej práci stroja v bezobslužnom režime počas noci, víkendov a sviatkov. Reálne tak vychádza celkový časový fond stroja približne 4 200 hodín ročne.

5.2. Náklady na spotrebný materiál N_s

Pre zabezpečenie hospodárnej a kvalitnej prevádzky stroja treba v pravidelných intervaloch podľa odporúčenia výrobcu meniť spotrebný materiál podľa tab. 6.

Tab. 6 Tabuľka spotrebných materiálov.

Položka	Množstvo za rok	Jednotka	Cena	Jednotka	Celková suma za rok	Jednotka
Destilovaná voda	2000	l	0,07	EUR/l	140	EUR
Privádzač prúdu	1	pár	40	EUR/ks	40	EUR
Sada vodítok	1	pár	380	EUR/pár	380	EUR
Filtre	18	ks	130	EUR/ks	2 340	EUR
Trysky	6	sada	10	EUR/sadu	60	EUR
Deionizačná náplň	200	l	3	EUR/l	600	EUR
Celkové náklady na spotrebný materiál P_s					3 560	EUR
Ročný časový fond stroja					3 952	h
Podiel nákladov na spotrebný materiál N_s					0,90	EUR.h⁻¹

Podiel nákladov na spotrebný materiál je daný vzťahom:

$$N_s = \frac{P_s}{T_{FR}} \quad (17)$$

$$N_s = \frac{3\,560}{3\,952}$$

$$N_s = 0,9 \text{ EUR} \cdot h^{-1}$$

5.3. Náklady na drôt N_d

Vzhľadom na to, že nie je sledovaná spotreba rezacieho drôtu na jednotlivý výrobok, náklady na drôt sú vypočítané na základe celoročnej spotreby drôtu vydelenej počtom prevádzkových hodín stroja za rok (viď tab. 7).

Tab. 7 Tabuľka spotreby drôtu

Počet zakúpených cievok za rok n_c	83	ks
Množstvo drôtu na cievke m_c	8	kg
Cena 1kg drôtu C_d	6,99	EUR.kg ⁻¹
Celkové náklady na spotrebovaný drôt za rok P_d	4 641,36	EUR
Ročný časový fond stroja T_{FR}	3 952	h
Podiel nákladov na drôt N_d	1,17	EUR.h⁻¹

Cena spotrebovaného drôtu je daná vzťahom:

$$P_d = n_c \cdot m_c \cdot C_d \quad (18)$$

$$P_d = 83 \cdot 8 \cdot 6,99$$

$$P_d = 4\,641,36 \text{ EUR}$$

Podiel nákladov na drôt je daný vzťahom:

$$N_d = \frac{P_d}{T_{FR}} \quad (19)$$

$$N_d = \frac{4\,641,36}{3\,952}$$

$$N_d = 1,17 \text{ EUR} \cdot h^{-1}$$

5.4. Personálne náklady N_m

Na základe vnútropodnikovej kalkulácie sú stanovené personálne náklady na pracovníka vo výške $N_m = 10 \text{ EUR/hod.}$ Tieto náklady zahŕňajú náklady na mzdy, zákonné odvody, náklady na ochranné a pracovné pomôcky a pod.

5.5. Náklady na energiu N_e

Náklady na energiu sa skladajú zo spotreby elektrickej energie vypočítanej na základe príkonu stroja a z elektrickej energie potrebnej na výrobu stlačeného vzduchu (viď tab. 8).

Tab. 8 Náklady na energiu

Typ energie	Spotreba	Jednotka	Cena za jednotku	Jednotka	Cena za hodinu	Jednotka
elektrická energia	13	kW.h ⁻¹	0,21	EUR.kWh	2,73	EUR.h ⁻¹
Podiel nákladov na energiu N_e					2,73	EUR.h⁻¹

Podiel ostatných energií (energia na vykurovanie, klimatizáciu, osvetlenie...) sú zahrnuté v režijných nákladoch.

5.6. Náklady na údržbu

Údržba stroja je uskutočňovaná v časových intervaloch doporučených výrobcom, ktoré sú uvedené v tab. 9.

Tab. 9 Intervaly a predpokladaná časová náročnosť údržby stroja Fanuc

Typ údržby	Početnosť	Dĺžka trvania údržby	Jednotka	Prepočet na 1rok	Jednotka
Zmenová	1 x za zmenu	0,25	h	124	h/rok
Týždenná	1x za týždeň	1	h	52	h/rok
Mesačná	1x za mesiac	3	h	36	h/rok
Polročná	2x za rok	2	h	4	
Ročná	1x za rok	2	h	2	h/rok
Opravy po poruche	*	30	h	30	h/rok
Celkový čas určený pre údržbu $T_{\dot{u}}$				248	h/rok

*určené na základe doterajších skúseností

Tab. 10 Náklady na údržbu

Náklady na interný servis N_{uint}	2 480	EUR
Náklady na externý servis N_{uext}	1 500	EUR
Náklady na náhradné diely N_{und}	3 600	EUR
Ročné náklady na údržbu $P_{\dot{u}}$	7 580	EUR
Ročný časový fond stroja T_{FR}	3 952	h
Podiel nákladov na údržbu $N_{\dot{u}}$	1,92	EUR.h⁻¹

- N_{uint} - Náklady na údržbu vykonávanú vlastnými pracovníkmi sú:

$$N_{uint} = T_{\dot{u}} \cdot N_m \quad (20)$$

$$N_{uint} = 248 \cdot 10$$

$$N_{uint} = 2\,480 \text{ EUR}$$

- N_{uext} - Náklady na externý servis na základe doterajších skúseností sú vo výške 1 500 EUR/rok.
- N_{und} - Náklady na náhradné diely podľa doterajších skúseností sú 3 600 EUR

$$N_{\dot{u}} = \frac{N_{uvt} + N_{uext} + N_{und}}{T_{FR}} \quad (21)$$

$$N_C = \frac{2\,480 + 1\,500 + 3\,600}{3\,952}$$

$$N_C = 1,92 \text{ EUR} \cdot h^{-1}$$

5.7. Podiel výrobnnej a správnej réžie

Výška výrobnnej a správnej réžie je stanovená pre r. 2017 na základe vnútropodnikového kalkulačného vzorca na $N_r = 10 \text{ EUR} \cdot h^{-1}$.

5.8. Hodinová sadzba stroja N_c

Je súčtom všetkých nákladov popísaných v predchádzajúcich kapitolách.

$$N_C = N_o + N_s + N_d + N_m + N_e + N_u + N_r \quad (22)$$

$$N_C = 5,46 + 0,9 + 1,17 + 10 + 2,73 + 1,92 + 10$$

$$N_C = 32,18 \text{ EUR} \cdot h^{-1}$$

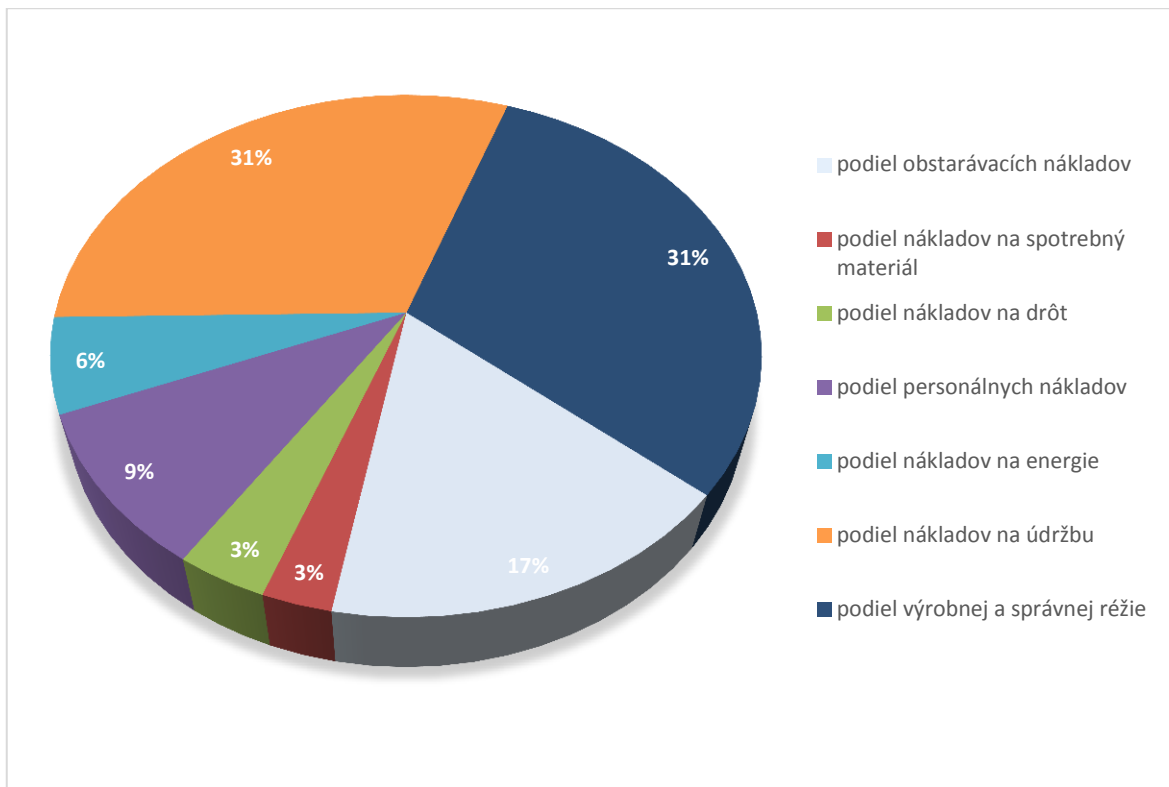
Kde:

- N_c [EUR.h-1] – hodinová sadzba stroja
- N_o [EUR.h-1] – podiel obstarávacích nákladov
- N_s [EUR.h-1] – podiel nákladov na spotrebný materiál
- N_d [EUR.h-1] – podiel nákladov na drôt
- N_m [EUR.h-1] – podiel personálnych nákladov
- N_e [EUR.h-1] – podiel nákladov na energie
- N_u [EUR.h-1] – podiel nákladov na údržbu
- N_r [EUR.h-1] – podiel výrobnnej a správnej réžie

Výsledná hodinová sadzba je v porovnateľnej výške ako u podobných firiem v regióne, čo tiež zaručuje konkurencieschopnosť firmy FOR MIX s.r.o.

5.9. Grafické zobrazenie rozboru nákladov

Na obr. 43 je znázornený graf, ktorý vyjadruje podiel jednotlivých zložiek nákladov na elektroiskrové drôtové rezanie popísaných v kapitole 5.



Obr. 43 Podiel jednotlivých nákladov na hodinovej sadzbe elektroiskrového drôtového rezania.

DISKUSIA

Výroba lisovacích nástrojov je kusová výroba. Napriek tomu je konštrukčná a technologická príprava výroby v spoločnosti FOR MIX s.r.o. pomerne podrobná. Bolo by však vhodné pri technologických postupoch uvádzať doporučené rezné podmienky. Tie si síce operátor dokáže vybrať z riadiaceho systému stroja, ale pomohlo by to ako ďalšia úroveň kontroly procesu.

Z nákladového hľadiska je možné konštatovať, že nie je veľký priestor na znižovanie nákladov pri procese drôtového rezania.

Podiel obstarávacích nákladov je menší než bolo pri nákupe stroja predpokladané. Je priaznivé, že naplnenosť zákazkami je tak veľká, že nie je potrebné hľadať ďalšie využitie kooperačnými zákazkami, a že oproti predpokladanému využitiu 12 hodín denne, je skutočné využitie 16 a viac hodín.

Náklady na spotrebný materiál sú vyššie, než boli kalkulované pred nákupom stroja. Je to dané tým, že spotreba tohto materiálu je síce na nižšej úrovni, ale ceny sú o niečo vyššie než by mohli byť. FOR MIX s.r.o. totižto nevyužíva najlacnejších dodávateľov, ale tých, u ktorých má overenú kvalitu. Tento prístup je z dlhodobého hľadiska výhodnejší.

Personálne náklady - mzdy sú o cca 15 % vyššie, ako je priemer v danom regióne. I to umožňuje udržiavať vysokokvalifikovaný, stabilný a motivovaný personál.

Náklady na údržbu sú na predpokladanej úrovni. Je to dané tým, že FOR MIX s.r.o. dodržiava intervaly údržby doporučené výrobcom, rovnako ako intervaly výmeny náhradných dielov. Pri správne vykonávanej údržbe sa stroj vyznačuje vysokou mierou spoľahlivosti. FOR MIX s.r.o. používa originálne náhradné diely, ako aj autorizovaný servis pre tieto stroje.

Vypočítaná hodinová sadzba je 32,18 EUR/h a je v porovnateľnej úrovni ako podobné konkurenčné firmy. Táto suma je používaná na vypočítanie ceny pre kooperačné zákazky. Pre určovanie ceny na výrobu kompletného postupového lisovacieho nástroja je táto sadzba udávaná len informačne, pretože celková cena za nástroj je určená na základe cenovej dohody.

Odporúčania pre zlepšenie a zefektívnenie procesu elektroiskrového drôtového rezania:

- Otestovať povlakovaný drôt od výrobcu ELERO s označením ELECUT SUPER ZINC s pevnosťou v ťahu 980 N/mm^2 , s priemerom 0,25 mm. Tento drôt sa skladá z mosadzného jadra a viacnásobného povlaku zo zliatiny zinku, volfrámedi a vzácnych kovov. Výrobca tohto drôtu deklaruje až o 30 % nižšie náklady oproti mosadzným drôtom. Použitie tohto drôtu môže priniesť zvýšenie produktivity rezania ako aj vyššiu presnosť a drsnosť povrchu. Za účelom dosiahnutia reprezentatívnych výsledkov, je potrebné uskutočniť tento test v trvaní aspoň 350 hodín. Pre správne vyhodnotenie testu bude potrebné vyhodnotiť nielen náklady na drôt a časovú náročnosť, ale aj dosiahnutú rozmerovú presnosť a drsnosť povrchu.
- Vzhľadom na vysokú spoľahlivosť využívať v maximálnej možnej miere nočné a víkendové zmeny v bezobslužnom režime.

ZÁVER

Táto práca je zameraná na praktické využitie elektroiskrového obrábania drôtovou elektródou v strojárskej firme FOR MIX s.r.o. so sídlom v Trenčíne, ktorej hlavným výrobným programom je výroba lisovacích nástrojov. Pri tejto výrobe sú využívané hlavné výhody elektroiskrového rezania, t.j. tvorba tvarovo zložitých rezov v materiáloch s vysokou tvrdosťou. Za účelom analýzy procesu rezania bola ako typický predstaviteľ vybraná strižnica, ktorá je súčasťou postupového združeného lisovacieho nástroja.

Výsledky diplomovej práce je možné zhrnúť do týchto bodov:

- Bol spracovaný technologický postup výroby typického predstaviteľa.
- Pomocou softvéru Wirecut bol vytvorený NC program v ISO kóde pre stroj Fanuc.
- Bol monitorovaný samotný proces elektroiskrového rezania. Priebeh hrubovacieho rezu bol bezproblémový, avšak pri dokončovacom reze dochádzalo k pretrhnutiu drôtu. Po skontrolovaní vygenerovaných parametrov rezania bola hodnota napnutia drôtu T znížená z 2 400 na 2 000. Po tejto úprave už nedošlo k ďalšiemu pretrhnutiu drôtu a dokončovací rez prebehol plynule.
- Kompletným rozborom nákladov elektroiskrového obrábania drôtovou elektródou, bola vypočítaná hodinová sadzba stroja. Výsledná hodnota 32,18 EUR je porovnateľná s hodinovou sadzbou používanou v iných firmách, čo zaručuje konkurencieschopnosť.

Celkovo možno povedať, že výrobný proces je riadený a organizovaný na vysokej úrovni, o čom svedčí vysoká naplnenosť zákazkami a stabilní zákazníci. Spoločnosť kladie dôraz na neustále zlepšovanie kvality výrobkov a produktivity práce.

ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV

1. MIČIETOVÁ, Anna. *Nekonvenčné metódy obrábania*. Žilina : Žilinská univerzita, 2001. 376 s. ISBN 80-7100-853-2.
2. MAŇKOVÁ, Ildikó. *Progresívne technológie: Advanced methods of material removal*. Košice: Viena, 2000. ISBN 8070994304.
3. ČERNOCH, Svatopluk. *Strojně technická příručka*. 12. vyd., přepracované. Praha: SNTL-Nakladatelství technické literatury, 1968.
4. VIGNER, Miloslav a Zdeněk PŘIKRYL. *Obrábění*. Vyd. 1. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1984, 800 s. : il.
5. KOCMAN, Karel. *Technologické procesy obrábění*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011. ISBN 9788072047222.
6. JAHAN, M.P., ed. *Electrical discharge machining (EDM): types, technologies and applications*. New York: Nova Science Publishers, 2015, 493 s. ISBN 978-163-4835-916. Dostupné také z: http://irep.iium.edu.my/45837/1/Published_eBook.pdf
7. EDM wire primer. KERN, Roger. *EDM Today magazine* [online]. January/February. 2007, s. 10-17 [cit. 2017-05-18]. Dostupné z: <http://www.gedms.com/technicalArticles/TechTipsJ-F-7.pdf>
8. SADÍLEK, Marek. *Nekonvenční metody obrábění I: elektroerozivní, elektrochemické a chemické obrábění*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2016. ISBN 978-80-248-3943-1.
9. BEREŠÍK, Tomáš, Anna MIČIETOVÁ a Stanislav MÔCIK. *Vplyv vybraných faktorov na kvalitu povrchu pri elektroerozivnom hĺbení*. *Tribotechnika*. Techpark, 2010, **III**(3/2010), 38-40.
10. ZEILMANN, Rodrigo Panosso; VACARO, Thiago; ZANOTTO, Fernando Moreira and CZARNOBAY, Mariana. *Metallurgical alterations in the surface of steel cavities machined by EDM*. *Matéria (Rio J.)* [online]. 2013, vol.18, n.4 [cit. 2017-03-20], pp.1541-1548. Dostupné z: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1517-70762013000400014&lng=en&nrm=iso>. ISSN 1517-7076. <http://dx.doi.org/10.1590/S1517-70762013000400014>.
11. OSIČKA, Karel a Milan KALIVODA. *Nekonvenční technologie obrábění: vzdělávací a tréninkový modul*. Brno, 2012, 96 s. Učební text Vysokého učení technického v Brně.

12. Wire EDM: The fundamentals. *EDM Network Inc.* [online]. Sugar Grove, IL, USA, 2013 [cit. 2017-03-22]. Dostupné z: <https://www.edmnetwork.com/wire-edm-the-fundamentals-by-donald-b-moulton>
13. BARCAL, Jaroslav. *Nekonvenční metody obrábění*. 1. vyd. Praha: České vysoké učení technické, 1989, 122 s.
14. *Technology of spark erosion*. Oelheld GmbH [online]. [2011] [cit. 2015-05-20]. Dostupné z: <http://www.oelheld.com/innovation/wissenswertes-zur-senkerosion/technologie-des-senkerodierens.html>
15. RAO, Sreenivasa a Venkaiah NAIDU. Review on Wire - Cut EDM Process. *International Journal of Advanced Trends in Computer Science and Engineering*. SVITS, Mahabubnagar - 204, AP, India, 2013, 2(6), 12-17. ISSN 2278-3091. Dostupné z: <http://www.warse.org/pdfs/2013/spicetem201304.pdf>
16. ŤAVODOVÁ, Miroslava. *Skúmanie stavu tepelne ovplyvnenej oblasti materiálu po elektroiskrovom drôtovom rezaní*. ACTA FACULTATIS TECHNICAЕ ZVOLEN. 2014, XIX(1), 145-152. Dostupné také z: https://www.tuzvo.sk/files/FEVT/aft/archiv/aft_1_2014_journal.pdf
17. B., Sivaraman, Eswaramoorthy C. a Shanmugham E.P. *Optimal control parameters of machining in CNC Wire-Cut EDM for Titanium*. *Int. Journal of Applied Sciences and Engineering Research*. 2015, 4(1), 102-121. DOI: 10.6088/ijaser.04011. ISSN 2277 – 9442. Dostupné také z: <http://www.ijaser.com/articles/vol4issue12015/vol4issue1/JASER4011.pdf>
18. SHABGARD, Mohammadreza, Mirsadegh SEYEDZAVVAR a Samad Nadimi Babil OLIAEI. *Influence of Input Parameters on the Characteristics of the EDM Process*. *Strojníški vestnik – Journal of Mechanical Engineering*. 2011, 57(09), 689-696. DOI: 10.5545/sv-jme.2011.035. ISSN 00392480. Dostupné také z: http://en.sv-jme.eu/data/upload/2011/09/07_2011_035_Shabgard_04.pdf
19. Penta trading s.r.o.: *Vysokorychlostní elektroerozivní drátové řezačky Fanuc Robocut* [online]. 2007 [cit. 2017-05-15]. Dostupné z: http://www.penta-edm.cz/dokumenty/pouzite_stroje/katalog_fanuc_c_cz.pdf
20. MOURALOVÁ, K. *Moderní technologie drátového elektroerozivního řezání kovových slitin*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 98 s. Vedoucí dizertační práce prof. Ing. Miroslav Píška, CSc..

21. *Fanuc Robocut řady α -CiB: Elektroerozivní stroje*. In: Penta trading s.r.o. [online]. 2016 [cit. 2017-05-16]. Dostupné z: <http://www.penta-edm.cz/dokumenty/produkty/fanuc-cib-penta-cj.pdf>
22. *Drátové řezačky řada Fanuc Robocut α -iE: Manuál pro obsluhu*. 4/2011. PENTA TRADING s.r.o..
23. *Kapitola 19 : Drôty do EDM rezačiek: Všetko pre elektroeroziu*, Kvantum s.r.o. [online]. V3. Považská Bystrica, 2016 [cit. 2017-05-18]. Dostupné z: <http://www.kvantum.sk/files/Kapitola-19---Rezacie-droty.pdf>
24. *Wire EDM deionizing resin*. KERN, Roger. EDM Today magazine [online]. Summer. 2010, s. 10-16 [cit. 2017-05-18]. Dostupné z: http://www.edmtodaymagazine.com/2015/archives/issues/2010_Summer/#p=1
25. *Rezacie drôty: ELERO s.r.o.* Považská Bystrica, 2014. Dostupné také z: http://www.elero.sk/storage/sk_katalogy/1_Rezacie_droty.pdf
26. *1.2379 (X155CrVMo12-1, 19 573): Vlastnosti oceli 1.2379*. Preciz, s.r.o [online]. 2012 [cit. 2017-05-18]. Dostupné z: <http://www.preciz.cz/sluzby-hlavni/material-normal/1.2379>
27. *Nástrojová ocel 1.2379, informativní list* [online]. Bolzano, 2012 [cit. 2017-05-18]. Dostupné z: http://www.bolzano.cz/assets/files/NO/1.2379_cesky.pdf
28. *Img1.jpg: Wire cut EDM products*. In: Kingred CNC Technology Co. [online]. Jiangsu Province, China, 2011 [cit. 2017-03-30]. Dostupné z: <http://www.kingedms.com/blog/wp-content/uploads/2011/11/img1.jpg>
29. *Robocutalphac600ib_large*. In: Fanuc Corporation [online]. [cit. 2017-05-11]. Dostupné z: http://fanuc.co.jp/en/product/robocut/image/robocutalphac600ib_large.jpg

ZOZNAM POUŽITÝCH SYMBOLOV

SYMBOL	JEDNOTKA	VÝZNAM SYMBOLU
C_d	[EUR]	cena 1kg drôtu
I	[A]	elektrický rúd
$I(t)$	[A]	hodnota prúdu impulzu
I_e	[A]	stredný prúd
I_{ef}	[A]	efektívna hodnota prúdu počas celej doby periódy
I_j	[A]	prúd v iskrisku
I_{st}	[A]	stredná hodnota prúdu počas celej doby periódy
I_z	[A]	prúd výboja
MRR	$[mm^3 \cdot s^{-1}]$	miera odstraňovania materiálu
N	[-]	počet impulzov počas chodu
N_d	[EUR]	podiel nákladov na drôt
N_e	[EUR]	podiel nákladov na energie
N_m	[EUR]	podiel personálnych nákladov
N_o	[EUR]	podiel obstarávacích nákladov
N_r	[EUR]	podiel výrobnéj a správnej réžie
N_s	[EUR]	podiel nákladov na spotrebný materiál
N_u	[EUR]	podiel nákladov na údržbu
N_{uext}	[EUR]	náklady na externý servis
N_{uint}	[EUR]	náklady na interný servis
N_{und}	[EUR]	náklady na náhradné diely
N_{uvl}	[EUR]	náklady na údržbu vykonávanú vlastnými pracovníkmi
P_d	[EUR]	celkové náklady na spotrebovaný drôt za rok
P_o	[EUR]	celkové obstarávacie náklady
P_s	[EUR]	celkové náklady na spotrebný materiál
$P_{\dot{u}}$	[EUR]	Celkové ročné náklady na údržbu
$Q_{a,c}$	$[mm^3 \cdot s^{-1}]$	rýchlosť erózie, udávaná aj ako množstvo odobraného materiálu za jednotku času
S_m	[-]	počet zmien za deň (zmennosť)
T_1	$[\mu s]$	perióda výboja

T_{FR}	[h]	ročný časový fond stroja
T_{Sm}	[h]	pracovný čas na zmenu
$T_{\dot{U}}$	[h]	celkový čas určený pre údržbu
U	[V]	napätie
$U(t)$	[V]	hodnota napätia impulzu
U_c	[V]	napätie na kondenzátore
U_D	[V]	napätie na zdroji jednosmerného napätia
U_e	[V]	stredné napätie
U_{ef}	[V]	efektívna hodnota napätia počas celej doby periódy T
U_j	[V]	napätie v iskrisku
U_k	[V]	napätie pri vyhasnutí výboja
U_{st}	[V]	stredná hodnota napätia počas celej doby periódy T
U_z	[V]	zápalné napätie
V_i	[mm ³]	objem krátera
V_{ia}, V_{ic}	[mm ³]	množstvo odobraného materiálu
V_n	[mm ³]	objemové opotrebenie na nástrojovej elektróde
V_o	[mm ³]	objemové opotrebenie na obrábanej elektróde
W_i	[J]	vybíjacia energia
W_{st}	[J]	stredná hodnota energie počas celej doby periódy
$W_{st,im}$	[J]	stredná hodnota energie jedného impulzu
d	[mm]	priemer krátera
d_o	[rok]	doba odpisovania
f	[s ⁻¹]	frekvencia výboja
h	[mm]	hĺbka krátera
h_{OFST}	[mm]	korekcia
k_a, k_c	[-]	súčiniteľ zahrňujúci vplyv materiálu platný pre katódu (c) a anódu (a)
m_1	[g]	hmotnosť obrobku pred obrábaním
m_2	[g]	hmotnosť obrobku po obrábaní
m_c	[kg]	množstvo drôtu na cievke
m_i	[mm]	veľkosť iskrovej medzery

n_c	[ks]	počet zakúpených cievok
n_{pd}	[-]	počet pracovných dní r.2017
r	[mm]	polomer kráteru
t	[μ s]	čas trvania výboja
t_1	[s]	čas rezného procesu
t_d	[μ s]	doba oneskorenia výboja
t_e	[μ s]	doba výboja
t_i	[μ s]	doba impulzu
t_o	[μ s]	doba pauzy
$\varnothing_{drôt}$	[mm]	priemer drôtu
η_d	[%]	účinnosť elektrického náboja
ϑ	[%]	relatívne objemové opotrebenie nástrojovej elektródy
π	[-]	Ludolfovo číslo
ρ	[g.mm ³]	hustota obrábaného materiálu
τ	[μ s]	čas trvania impulzu

ZOZNAM POUŽITÝCH SKRATIEK

SKRATKA	VÝZNAM SKRATKY
AC	striedavý prúd
AWT	automatické navliekanie drôtu
C	označenie kondenzátora
CAD	Computer Aided Design
CNC	Computer Numerical control
Cu	meď
D	označenie diódy
DC	jednosmerný prúd
DXF	Drawing Exchange Format.
EDG	Electrical Discharge Grinding
EDM	Electrical Discharge Machining
FR	tlak výplachu (označenie v prostredí stroja Fanuc)
G	generátor
HB	tvrdosť podľa Brinella
IACS	International Annealed Copper Standard
IGES	Initial Graphics Exchange Specification
L	označenie cievky
LPA	hladina akustického tlaku s váhovým filtrom A
LPC	hladina akustického tlaku s váhovým filtrom C
M	hnací motor
MV	multivibrátor
NC	Numerical Control
OFF	čas pauzy (označenie v prostredí stroja Fanuc)
ON	čas pulzu (označenie v prostredí stroja Fanuc)
R	označenie rezistora
RC	elektrický obvod tvorený rezistorom R a kondenzátorom C
RL	elektrický obvod tvorený rezistorom R a cievkou L
RLC	elektrický obvod tvorený rezistorom R, cievkou L a kondenzátorom C
SiC	karbid kremíka

SV	servonapätie (označenie v prostredí stroja Fanuc)
T	napnutie drôtu (označenie v prostredí stroja Fanuc)
T1, T2	výkonové tranzistory
TiN	nitrid titanu
VM	amplitúda prúdu (označenie v prostredí stroja Fanuc)
WEDM	Wire Electrical Discharge Machining
WF	odvin drôtu (označenie v prostredí stroja Fanuc)
Z	zosilňovač
Zn	zinok
J	iskrisko
VS	napätie naprázdno(označenie v prostredí stroja Fanuc)

ZOZNAM PRÍLOH

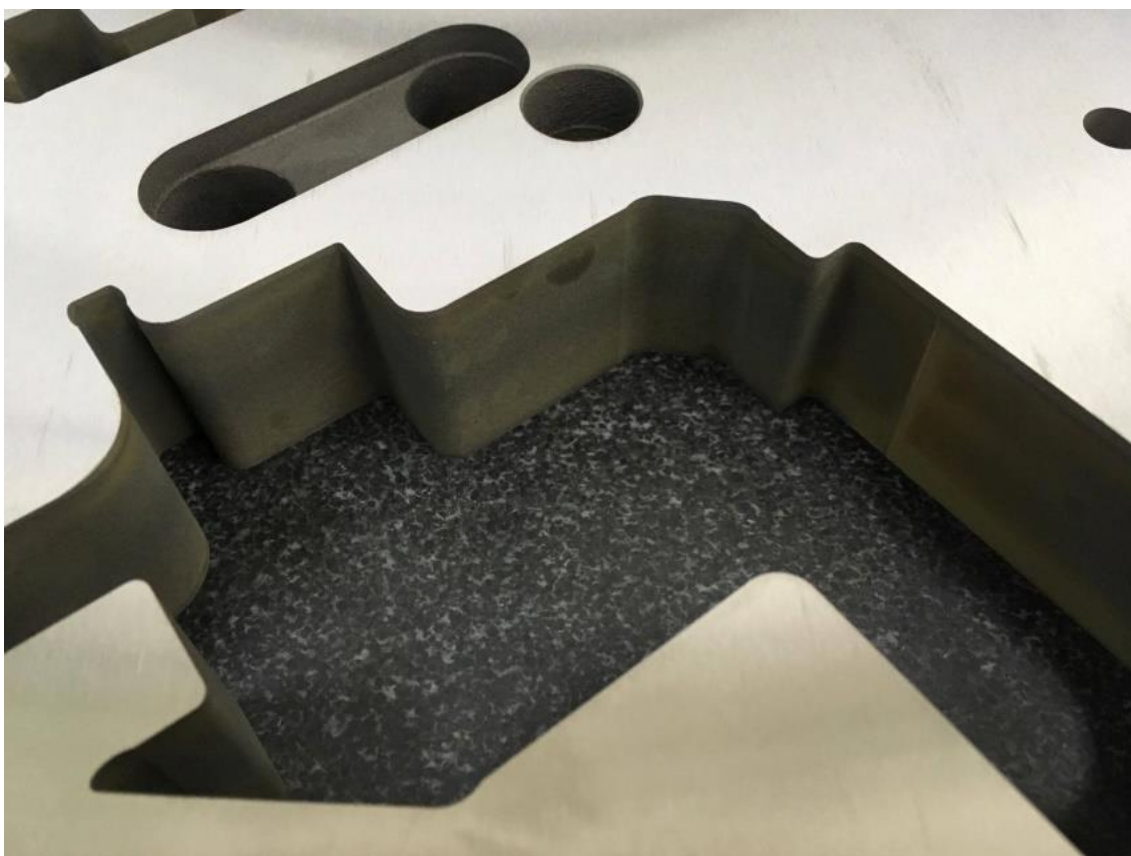
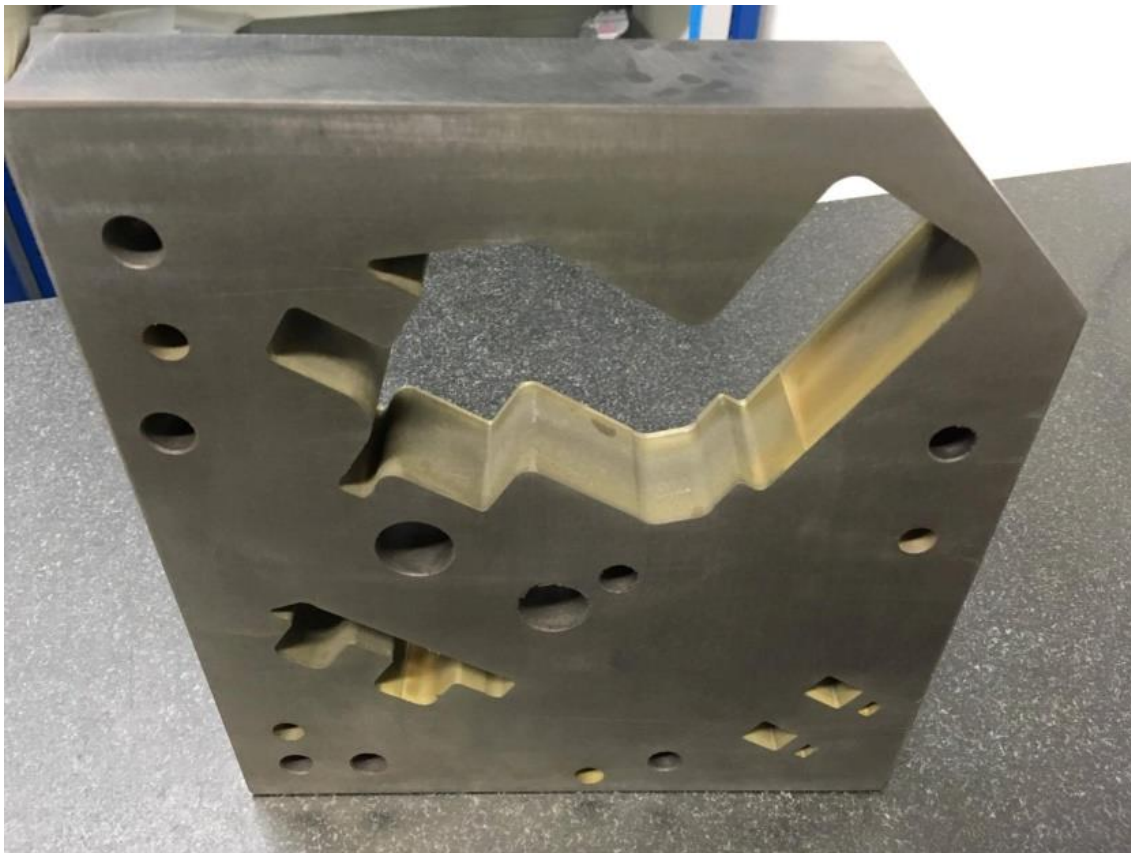
Príloha 1 – Strižnica po elektroiskrovom rezaní drôtovou elektródou.

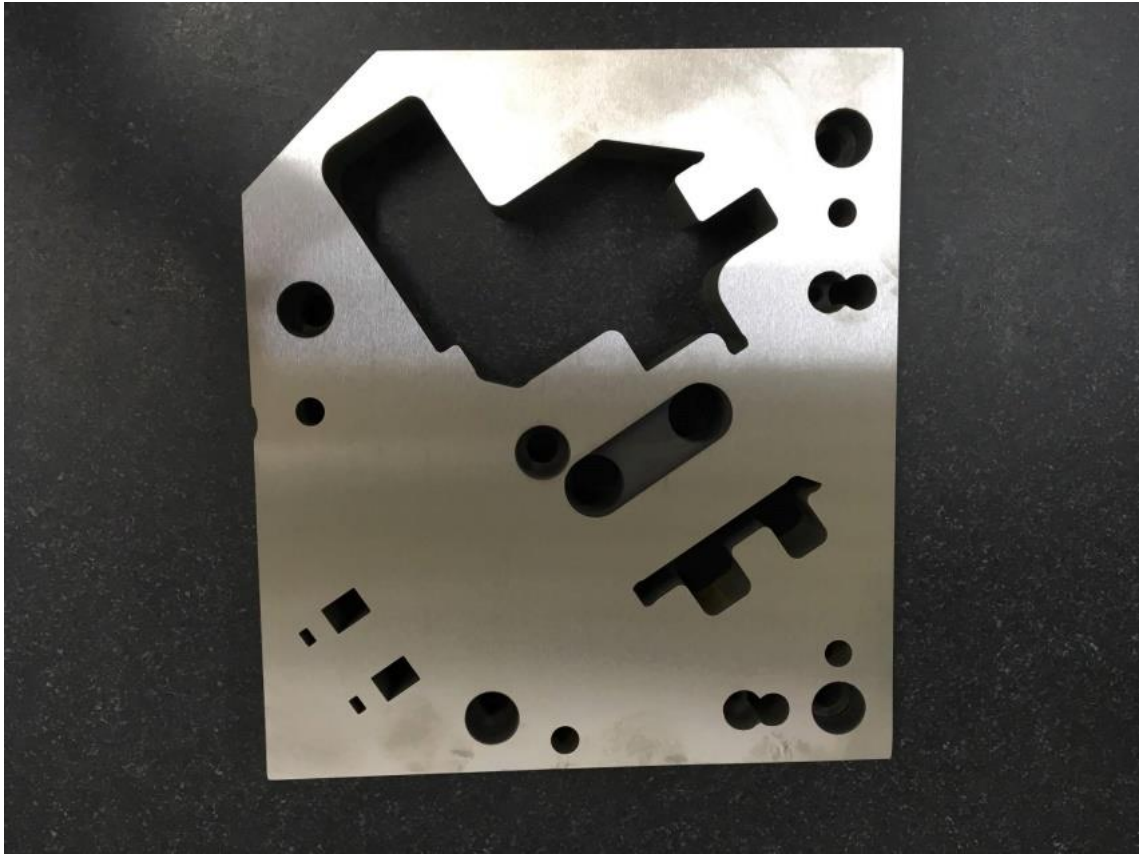
Príloha 2 – Atest materiálu po tepelnom spracovaní.

Príloha 3 – NC program.




Príloha 4 – Technologický výkres 1_STRIZNICA_3 pre rezanie na drôtovej rezačke.

PRÍLOHA 1





PRÍLOHA 2

	
Atest (Prohlášení o jakosti) č. 2140/2017	
Zákazník : FOR MIX	Název součástky: Různé díly
Objednávka : 2017342	Počet kusů : 17
Zakázka č.: ---	Č. výkresu : ---
Protokol o měření č.: ---	Materiál : 1.2379
Předepsaná tvrdost : 60 – 62 HRC	Naměřená tvrdost : 60 HRC
Vsetín dne : 22.5.2017	Podpis : Ing. Korytář Razítko : 

PRÍLOHA 3

%

O0001(OA135);
(W1 NORMAL FORWARD);
M15P0;
G92X139.Y-129.;
G90;
G50;
M60;
M27;
E40;
G10P9998R0.0000;
G01X148.4228Y-123.112G41;
X141.2487Y-111.631;
G03X138.4927Y-110.9947I-1.6961J-1.0598;
G01X135.5247Y-112.8494;
G02X132.7664Y-112.2092I-1.0598J1.6961;
G01X127.9756Y-104.5426;
G03X124.2392Y-100.4653I-4.9394J-0.7758;
G01X114.6097Y-98.0783;
G03X109.3072Y-100.0688I-1.203J-4.8531;
G01X82.8814Y-116.5818;
G02X75.9922Y-114.9904I-2.6488J4.2407;
G01X68.7237Y-103.3587;
G03X67.3478Y-103.0398I-0.8478J-0.5303;
G01X48.1551Y-115.033;
G02X41.2649Y-113.442I-2.6496J4.2402;
G01X40.184Y-111.7118;
G03X37.7799Y-108.1777I-4.9395J-0.7753;
X36.743Y-108.1914I-0.5071J-0.8619;
G01X32.8562Y-110.6197;
G03X32.3903Y-111.5594I0.5298J-0.8481;
X34.5066Y-115.2007I4.979J0.4582;
G01X41.1739Y-125.8705;
G02X37.3563Y-142.4061I-10.1766J-6.359;
G01X23.691Y-150.9452;

G03X22.7366Y-155.0791I1.5898J-2.5441;
G01X28.275Y-163.9424;
G03X31.0309Y-164.5786I1.6961J1.0598;
G01X47.3982Y-154.3512;
G02X50.1542Y-154.9874I1.0598J-1.6961;
G01X57.573Y-166.8601;
G02X56.9368Y-169.616I-1.6961J-1.0598;
G01X51.3902Y-173.0819;
G03X47.7907Y-175.6013I0.7758J-4.9394;
X48.5266Y-177.0756I0.8751J-0.484;
G01X81.0363Y-181.6446;
G03X85.8317Y-179.5558I0.6959J4.9513;
G01X115.7172Y-160.8813;
G02X122.607Y-162.4719I2.6496J-4.2402;
G01X142.2749Y-193.947;
G03X149.1647Y-195.5376I4.2402J2.6496;
G01X172.6985Y-180.8321;
G03X175.8798Y-167.0524I-5.2992J8.4805;
G01X148.6878Y-123.536;
M01;
X148.4228Y-123.112;
M01;
M29;
G01X139.Y-129.G40G50;
(W2 NORMAL FORWARD);
M50;
M15P0;
G00X43.Y-26.;
G92X43.Y-26.;
G50;
M60;
M27;
E40;
G10P9998R0.0000;
G01X38.231Y-18.7917G41;
X33.2387Y-22.0947;

G03X32.1106Y-27.639I2.2071J-3.336;
G01X33.9561Y-30.4261;
X37.772Y-36.1021;
G02X36.9572Y-40.2648I-2.4897J-1.6738;
G01X28.1208Y-46.211;
G02X23.9563Y-45.3959I-1.6749J2.4889;
G01X18.7624Y-37.6702;
X18.2017Y-36.8272;
G03X12.6642Y-35.7068I-3.3304J-2.2156;
G01X5.9647Y-40.1392;
G03X4.8541Y-45.7097I2.2071J-3.336;
G01X10.6655Y-54.3381;
G02X9.8528Y-58.504I-2.4875J-1.677;
G01X9.6535Y-58.6382;
G03X6.1868Y-61.1904I0.9423J-4.9104;
X6.4587Y-61.8968I0.4409J-0.2358;
G01X14.3849Y-64.7422;
G03X14.8072Y-64.7974I0.3379J0.9412;
X18.5572Y-62.5709I-0.4221J4.9822;
G01X70.0757Y-28.4955;
G03X73.6654Y-25.7717I-0.9032J4.9177;
X73.6009Y-24.7813I-0.8986J0.4388;
G01X70.0411Y-19.3992;
G03X69.1463Y-18.9527I-0.8341J-0.5517;
X65.256Y-21.2211I0.3036J-4.9908;
G01X58.2535Y-25.9334;
G02X54.0897Y-25.1193I-1.6749J2.4889;
G01X52.1084Y-22.1794;
X49.0669Y-17.6201;
X48.5139Y-16.7843;
G03X42.971Y-15.6557I-3.3358J-2.2074;
G01X38.648Y-18.5158;
M01;
X38.231Y-18.7917;
M01;
M29;

G01X43.Y-26.G40G50;
(W3 NORMAL FORWARD);
M50;
M15P0;
G00X157.Y3.;
G92X157.Y3.;
G50;
M60;
M27;
E40;
G10P9998R0.0000;
G01X153.0415Y0.3818G41;
X155.5115Y-3.3526;
G03X156.2044Y-3.4938I0.417J0.2758;
G01X167.0473Y3.6779;
G03X167.1885Y4.3707I-0.2758J0.417;
G01X161.9476Y12.2943;
G03X161.2548Y12.4355I-0.417J-0.2758;
G01X150.4119Y5.2638;
G03X150.2707Y4.571I0.2758J-0.417;
G01X152.7657Y0.7988;
M01;
X153.0415Y0.3818;
M01;
M29;
G01X157.Y3.G40G50;
(W4 NORMAL FORWARD);
M50;
M15P0;
G00X172.3248Y13.463;
G92X172.3248Y13.463;
G50;
M60;
M27;
E40;
G10P9998R0.0000;

G01X170.8652Y12.4976G41;
X172.2444Y10.4124;
G03X172.9372Y10.2712I0.417J0.2758;
G01X175.0224Y11.6504;
G03X175.1636Y12.3433I-0.2758J0.417;
G01X172.4053Y16.5136;
G03X171.7124Y16.6548I-0.417J-0.2758;
G01X169.6272Y15.2756;
G03X169.486Y14.5827I0.2758J-0.417;
G01X170.5894Y12.9146;
M01;
X170.8652Y12.4976;
M01;
M29;
G01X172.3248Y13.463G40G50;
(W5 NORMAL FORWARD);
M50;
M15P0;
G00X173.Y-22.;
G92X173.Y-22.;
G50;
M60;
M27;
E40;
G10P9998R0.0000;
G01X169.414Y-24.3718G41;
X172.0615Y-28.3746;
G03X172.7544Y-28.5158I0.417J0.2758;
G01X183.5973Y-21.3441;
G03X183.7385Y-20.6513I-0.2758J0.417;
G01X178.4976Y-12.7277;
G03X177.8048Y-12.5865I-0.417J-0.2758;
G01X166.9619Y-19.7581;
G03X166.8207Y-20.451I0.2758J-0.417;
G01X169.1382Y-23.9548;
M01;

X169.414Y-24.3718;
M01;
M29;
G01X173.Y-22.G40G50;
(W6 NORMAL FORWARD);
M50;
M15P0;
G00X188.8748Y-11.559;
G92X188.8748Y-11.559;
G50;
M60;
M27;
E40;
G10P9998R0.0000;
G01X187.4152Y-12.5244G41;
X188.7944Y-14.6096;
G03X189.4872Y-14.7508I0.417J0.2758;
G01X191.5724Y-13.3716;
G03X191.7136Y-12.6787I-0.2758J0.417;
G01X188.9553Y-8.5084;
G03X188.2624Y-8.3672I-0.417J-0.2758;
G01X186.1772Y-9.7464;
G03X186.036Y-10.4392I0.2758J-0.417;
G01X187.1394Y-12.1074;
M01;
X187.4152Y-12.5244;
M01;
M29;
G01X188.8748Y-11.559G40G50;
M50;
G00X139.Y-129.;
M30;
%